

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Ohřívák parovzduchové směsi u flexibilního energetického systému

Heat Exchanger of Steam – Air Mixture in Flexible Energy System

Student:

Bc. Petr Cihlář

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2011

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22. 5. 2011

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo;
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Petr Cihlář

Adresa trvalého pobytu autora práce: Leskovec 19, 74901 Vítkov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CIHLÁŘ, P. Ohřívák parovzduchové směsi u flexibilního energetického systému: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 64 s. Vedoucí práce: Vilimec, L.

V diplomové práci se zabývám flexibilním energetickým systémem – FES, umožňující využít Braytnův cyklus, případně kombinovaný Braytnův a Rankin – Clausiuv cyklus. Jedná se o oběh s nepřímým spalováním, u kterého je pracovním médiem parovzduchová směs. V teoretické části diplomové práce popisuji FES, jeho možnosti ve využití a dále jeho výhody a nevýhody. Největší část diplomové práce je zaměřena na návrh alternativního zavěšení ohříváku parovzduchové směsi. Jedná se o návrh chlazených závěsů parovzduchovou směsí, na místo nechlazených závěsů navržených firmou Vítkovice Power Engineering. Návrh je proveden v 3D modelovacím programu s výkresovou dokumentací v příloze diplomové práce. U obou způsobů zavěšení počítám dilatační posuvy a v závěru hodnotím obě varianty zavěšení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CIHLÁŘ, P. Heat Exchanger of Steam – Air Mixture in Flexible Energy System: Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2011, 64 p. Thesis head: Vilimec, L.

This work is about Flexible Energy System – FES, for used in Braytnuv cycle, or combined Braytnuv and Rankin – Clausiuv cycle. This is a cycle with indirect combustion, where is a Steam – Air Mixture as working medium. In a teoretical part of master thesis I describe FES, its possibility in used and also an advantages and disadvantages. The main part of my thesis, is direct to design alternative hanging of Heat Exchanger Of Steam – Air Mixture. This is a design colled hanging in a place no-colled hanging which is a design by company Vítkovice Power Engineering. The project is maked in 3D modelling program with drawing documentation in annexe of thesis. I calculate dilatation in alternativ and originál hanging and in conclusion of master thesis I evaluate these variants of hanging.

Obsah

Seznam použitých symbolů a označení	8
1 Úvod	11
2 Flexibilní energetický systém (FES)	12
2.1 Flexibilní kogenerační systém FCS	15
2.2 Flexibilní energetický systém pro využití odpadního tepla HRFES	17
2.3 Kombinovaný cyklus se spalováním uhlí CCCC	18
3 Demonstrační jednotka flexibilního energetického systému	20
3.1 Umístění demonstrační jednotky	21
3.2 Řešení projektu	22
4 Výpočet termodynamických a transportních vlastností parovzduchové směsi	28
4.1 Stanovení hmotnostních koncentrací suchého vzduchu a vodní páry	29
4.2 Stanovení parciálních tlaků suchého vzduchu a vodní páry	30
4.3 Entalpie parovzduchové směsi	31
4.4 Hustota parovzduchové směsi	31
4.5 Tepelná vodivost parovzduchové směsi	32
4.6 Viskozita parovzduchové směsi	33
4.7 Určení měrné vlhkosti a entalpie v určitých bodech systému	34
5 Ohřívák parovzduchové směsi	35
5.1 Tepelná bilance OPVS	38
5.1.1 Tepelný výkon OPVS na straně PVS	39
5.1.2 Tepelný výkon OPVS na straně spalin:	42
5.1.3 Výkony jednotlivých sekcí OPVS	43
5.2 Tepelná roztažnost závěsů trubek OPVS	46
5.2.1 Tepelná roztažnost části závěsu Z5 umístěná ve spalinách	48
5.2.2 Tepelná roztažnost části závěsu Z5 umístěná v izolaci	48
5.2.3 Tepelná roztažnost části závěsu Z5 umístěná mimo výměník	51
5.3 Návrh alternativního zavěšení OPVS	54
5.4 Tepelná roztažnost alternativního zavěšení	59
5.5 Porovnání obou způsobů zavěšení	60
6 Závěr	62
7 Seznam použité literatury	63
8 Seznam příloh	64

Seznam použitých symbolů a označení

Značka	Veličina	Jednotka
c_{sv}	střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$
d	měrná vlhkost vlhkého vzduchu	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
i_{sm}	entalpie parovzduchové směsi	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$
i_{sv}	entalpie suchého vzduchu	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$
i_{vp}	entalpie vodní páry	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$
M_{sv}	molární hmotnost suchého vzduchu	$[\text{kg.kmol}^{-1}]$
M_{vp}	molární hmotnost vodní páry	$[\text{kg.kmol}^{-1}]$
p_c	celkový tlak parovzduchové směsi	$[\text{bar}]$
p_N	normální tlak	$[\text{bar}]$
$p_{p, vl}$	parciální tlak vodní páry ve vlhkém vzduchu	$[\text{bar}]$
$p_{p, s}$	parciální tlak suchého vzduchu ve vlhkém vzduchu	$[\text{bar}]$
p_{sv}	parciální tlak suchého vzduchu v pvs	$[\text{bar}]$
p_{vp}	parciální tlak vodní páry v pvs	$[\text{bar}]$
r_{sv}	měrná plynová konstanta suchého vzduchu	$[\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}]$
r_{vp}	měrná plynová konstanta vodní páry	$[\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}]$
T_N	normální teplota	$[\text{K}]$
t_{sm}	teplota parovzduchové směsi	$[\text{°C}]$
T_{sm}	teplota parovzduchové směsi	$[\text{K}]$
y_{sv}	molární koncentrace suchého vzduchu v pvs	$[\text{kmol.kmol}^{-1}]$
y_{vp}	molární koncentrace vodní páry v pvs	$[\text{kmol.kmol}^{-1}]$
w_{pd}	koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
w_{pp}	koncentrace procesní páry v pvs	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
w_{sv}	koncentrace suchého vzduchu v pvs	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
w_{vp}	koncentrace vodní páry v pvs	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
η_{sm}	dynamická viskozita pvs	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
η_{sv}	dynamická viskozita suchého vzduchu	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$

η_{vp}	dynamická viskozita vodní páry	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
λ_{sm}	tepelná vodivost <i>pvs</i>	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
λ_{sv}	tepelná vodivost suchého vzduchu	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
λ_{vp}	tepelná vodivost vodní páry	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
ν_{sm}	kinematická viskozita <i>pvs</i>	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
ρ_{sm}	hustota <i>pvs</i>	$[\text{kg.m}^{-3}]$
$\rho_{sm,N}$	hustota <i>pvs</i> při normálních podmínkách	$[\text{kg.m}^{-3}]$
φ	relativní vlhkost vlhkého vzduchu	[1]
m_{sp}	množství spalin	$[\text{kg.s}^{-1}]$
$t_{sp(1)}$	teplota spalin na vstupu do výměníku	$[\text{°C}]$
$t_{sp(2)}$	teplota spalin na výstupu z výměníku	$[\text{°C}]$
m_{pvs}	Hmotnostní průtok <i>pvs</i> v trubkovém prostoru	$[\text{kg.s}^{-1}]$
$t_{pvs(1)}$	teplota PVS na vstupu do výměníku	$[\text{°C}]$
$t_{pvs(2)}$	teplota PVS na výstupu z výměníku	$[\text{°C}]$
$p_{c(1)}$	celkový tlak <i>pvs</i> na vstupu do výměníku	[bar]
$p_{c(2)}$	celkový tlak <i>pvs</i> na výstupu z výměníku	[bar]
Q_{PVS}	tepelný výkon OPVS na straně <i>pvs</i>	[kW]
$I_{sp(1)}$	entalpie spalin na vstupu do OPVS	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$
$I_{sp(2)}$	entalpie spalin na výstupu z OPVS	$[\text{kJ.kg}^{-1}]$
Q_{Sp}	tepelný výkon na straně spalin	[kW]
Q_1	výkon první sekce OPVS	[kW]
Q_2	výkon druhé sekce OPVS	[kW]
Q_3	výkon třetí sekce OPVS	[kW]
Δl_{sp}	tepelná roztažnost závěsu ve spalinách	[mm]
l	délka závěsu	[mm]
Δt	rozdíl teplot v teplém a studeném stavu	$[\text{°C}]$
β	součinitel tepelné roztažnosti při teplotě Δt	$[\text{K}^{-1}]$
Pr	prandthlovo kritérium	[1]

ν	kinematická vízkozita	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
λ	součinitel tepelné vodivosti materiálu	$[\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
Re	reynoldsovo kritérium	[1]
Nu	nusseltovo kritérium	[1]
α_{sp}	součinitel přestupu tepla na straně spalin	$[\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
q_{iz}	teplo sdělené části závěsu v izolaci	$[\text{W}.\text{m}^{-2}]$
$t_{\text{iz}(1)}$	teplota závěsu na vstupu do izolace	$[^{\circ}\text{C}]$
$t_{\text{iz}(2)}$	teplota závěsu na výstupu z izolace	$[^{\circ}\text{C}]$
$t_{\text{str}(\text{iz})}$	střední teplota závěsu v izolaci	$[^{\circ}\text{C}]$
Δl_{iz}	tepelná roztažnost závěsu v izolaci	[mm]
q_{vz}	teplo sdělené části závěsu mimo OPVS	$[\text{W}.\text{m}^{-2}]$
$t_{\text{vz}(2)}$	teplota na konci závěsu	$[^{\circ}\text{C}]$
$t_{\text{str}(\text{vz})}$	střední teplota závěsu mimo OPVS	$[^{\circ}\text{C}]$
$t_{\text{str}(\text{vz})}$	střední teplota závěsu mimo OPVS	$[^{\circ}\text{C}]$
Δl_{vz}	tepelná roztažnost závěsu mimo OPVS	[mm]
Δl_{c}	celkové prodloužení závěsu	[mm]
FES	flexibilní energetický systém	
pvs	parovzduchová směs	
chsk	chlazená spalovací komora	
PLT	plynová turbína	
FCS	flexible cogeneration systém	
HRFES	heat recovery flexible energy systém	
CCCC	coal combustion combi cycle	
PVG	parovzduchový generátor	
NN	napájecí nádrž	
HRSG	heat recovery systém generation	
CHpvs	chladič parovzduchové směsi	
CCS	carbon capture and storage	

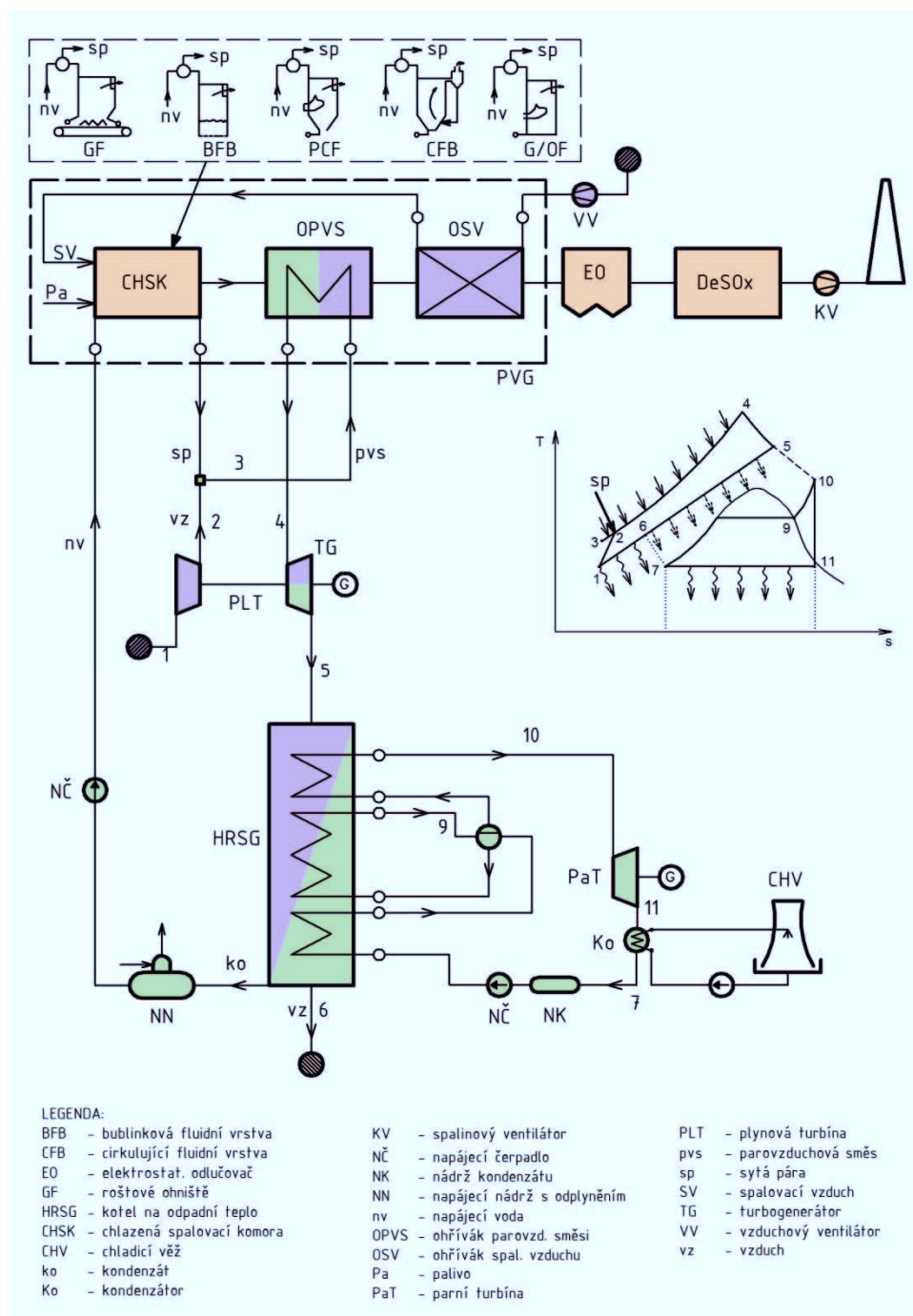
1 Úvod

V mé diplomové práci se zabývám flexibilním energetickým systémem - FES, umožňující využít Braytnův cyklus, případně kombinovaný Braytnův a Rankin – Clausiuv cyklus. Jedná se o vlhký oběh s nepřímým spalováním, u kterého je pracovním médiem parovzduchová směs. Tento nový energetický systém bude sloužit k výrobě elektrické energie, popřípadě ke kombinované výrobě elektrické energie a tepla. V současné době je ve výstavbě demonstrační jednotka tohoto systému vyvíjená společností Vítkovice Power Engineering.

V teoretické části diplomové práce popisuji FES, jeho možnosti ve využití a dále jeho výhody a nevýhody. V další kapitole se zabývám výpočtem termodynamických a transportních vlastností parovzduchové směsi pro následné použití v systému demonstrační jednotky. Největší část diplomové práce je zaměřena na ohřívač parovzduchové směsi - OPVS. Zde jsem počítal tepelný výkon jednotlivých sekcí ohřívače, jak na straně spalín, tak i na straně parovzduchové směsi. Cílem konstrukční části bylo navrhnout alternativní zavěšení OPVS, což znamenalo navrhnout chlazené závěsy samotnou parovzduchovou směsí, namísto nechlazených závěsů. Pro realizaci tohoto úkolu jsem celý OPVS, i mou navrženou alternativou závěsů namodeloval v 3 D programu (Solidworks). Dále jsem počítal tepelnou roztažnost chlazených i nechlazených závěsů a výsledné údaje porovnával mezi sebou. V závěru diplomové práce hodnotím navrženou alternativu závěsů s původním řešením.

2 Flexibilní energetický systém (FES)

FES – je flexibilní energetický systém, který pro transformaci primární energie pevných paliv na energii elektrickou s využitím Braytonova nebo kombinovaného Braytonova a Rankinova-Clausiova cyklu využívá technologii jejich spalování. Schéma je vidět na obrázku 1.

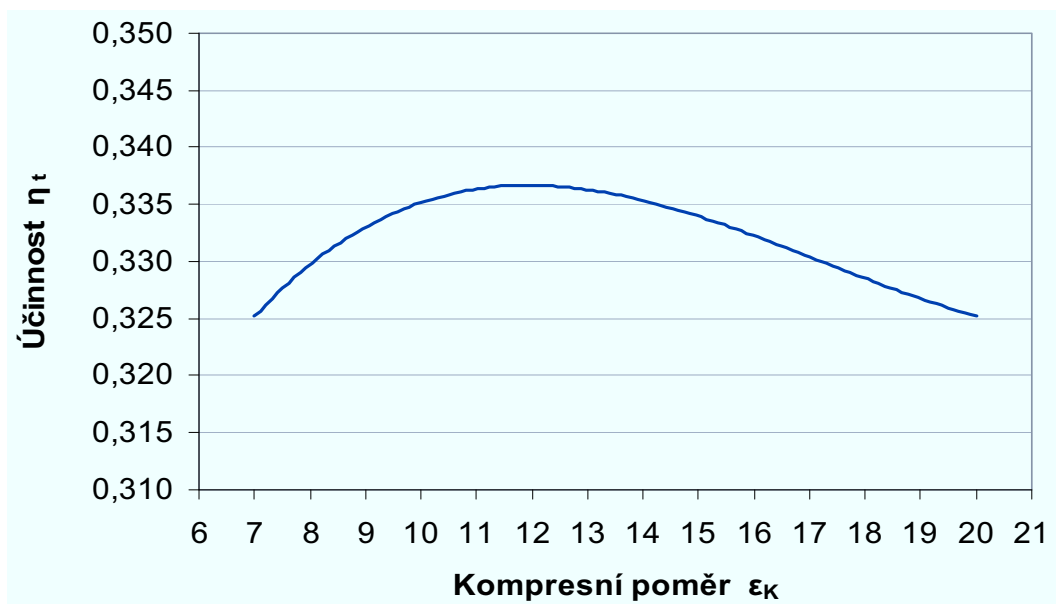


Obr. 1 Principiální schéma FES [1]

Zjednodušeně lze FES charakterizovat jako vlhký oběh s plynovou turbínou s nepřímým ohřevem pracovního média, kterým v nejjednodušších případech je směs vzduchu a vodní páry – stručně parovzduchová směs. Důvod pro využití parovzduchové směsi je vidět na obrázku 2. Se směsí vzduchu a páry se dosáhne větší entalpický spád na turbíně, (viz schéma 1, kap. 2.3). Zdrojem primární energie pro FES jsou pevná paliva (jako je např. uhlí, biomasa, alternativní paliva případně i odpady), ale i znečištěná plynná a kapalná paliva a odpady nevhodné pro přímé spalování v plynových motorech. Jako zdroj primární energie lze však využít i teplo odpadních spalin z různých tepelných agregátů.

Protože spalování uvedených paliv je prakticky proveditelné jen v ohništi s chlazenými stěnami, je použita klasická spalovací komora CHSK (chlazená spalovací komora) provedená z membránových stěn zapojených jako výparník s přirozenou cirkulací (předaným teplem ve spalovací komoře se vyrábí sytá pára) – ohniště může být roštové GF, práškové PCF, s bublinkovou fluidní vrstvou BFB, s cirkulující fluidní vrstvou CFB, ale též pro spalování plynných a kapalných paliv. Jak je zřejmé, tak pro spalování se u FES používá některé s vhodných a osvědčených provedení spalovací komory klasických kotlů – tím ale podobnost s běžnými kotli prakticky končí. Pro volbu teploty spalin na konci spalovací komory CHSK platí stejné zásady jako u klasických kotlů, před vstupem do komína se spaliny čistí od TZL např. v elektrostatickém odlučovači, pro splnění emisního limitu SO_2 je zařazeno odsiřovací zařízení DeSOx a u ohniště jsou uplatněna potřebná primární opatření.

Jak je vidět na obrázku 2, tak optimální kompresní poměr kompresoru plynové turbíny PLT se pohybuje na hodnotě 10 až 14, takže vzduch 1 nasávaný kompresorem se stlačí např. na 12bar a smísí se se sytou párou vyrobenou ve výparníku (stěny CHSK) – tlak páry v parním bubnu výparníku se nastavuje podle tlaku vzduchu za kompresorem. Vzniklá parovzduchová směs p_{vs} 3 s obsahem páry asi 12 až 20 % se pak spalinami vystupujícími z CHSK ohřívá v ohříváku parovzduchové směsi OPVS na pracovní teplotu vstupního média do plynové turbíny PLT, např. na 800°C.



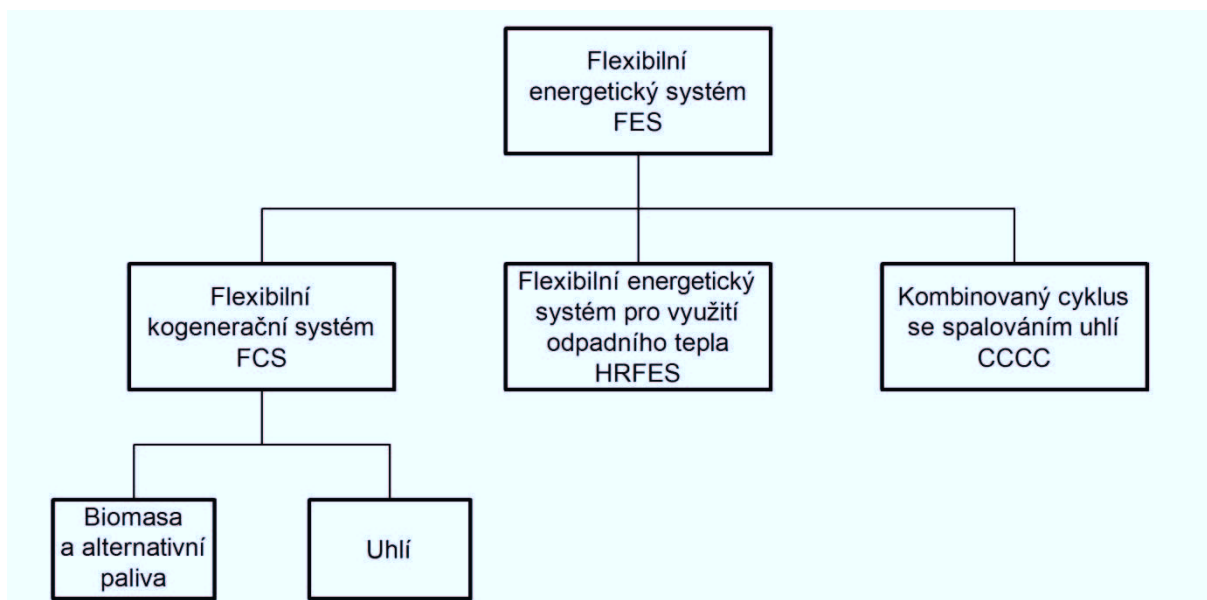
Obr. 2 Závislost účinnosti na kompresním poměru [1]

Po expanzi parovzduchová směs 5, v naznačeném provedení, vstupuje do kotle na odpadní teplo HRSG, který je součástí klasického parního Rankinova-Clausiova oběhu. V kotli HRSG se parovzduchová směs ochladí na teplotu rosného bodu, vzduch se zbytkovou vlhkostí 6 se vypouští do okolí a odloučený kondenzát se vrací do chladicího okruhu ChSK.

Pro vychlazení spalín na výstupní teplotu do komína je za OPVS zařazen klasický ohřívák spalovacího vzduchu OSV, případně i klasický ohřívák napájecí vody napájené do výparníku CHSK. Chlazená spalovací komora CHSK, ohřívák parovzduchové směsi OPVS a ohřívák spalovacího vzduchu tvoří jeden celek, který můžeme nazvat parovzduchový generátor PVG.

Z hlediska dopadu na životní prostředí je FES srovnatelný s dnes používanými nebo vyvíjenými technologiemi pro spalování tuhých paliv. Při spalování se vzduchem jsou emise stejné jako u stávajících kotlů spalující tatáž paliva, lze použít i vyvíjený tzv. bezemisní cyklus, pokud se pro spalování použije kyslík.

Základní myšlenka – využít klasickou technologii spalování pro transformaci primární energie tuhých paliv (uhlí, biomasa, alternativní paliva) a plyných a kapalných paliv (nevhodných pro spalování v plynových motorech) na tepelnou energii parovzduchové směsi, jakožto pracovního média s parametry vhodnými pro pohon plynové turbíny – je v principu využitelná u všech používaných energetických systémů, schematicky jsou možnosti naznačeny na obrázku 3.



Obr. 3 Možnosti využití FES [1]

FCS – je flexibilní kogenerační systém (Flexible Cogeneration System) využívající uhlí, biomasu i alternativní paliva a je zaměřen na jednotky nižších výkonů.

HRFES – je energetický systém využívající teplo odpadních plynů (Heat Recovery Flexible Energy System), např. za různými tepelnými agregáty v hutích.

CCCC – je kombinovaný paroplynový cyklus se spalováním uhlí (Coal Combustion Combi Cycle) pro elektrárenské bloky nejvyšších výkonů

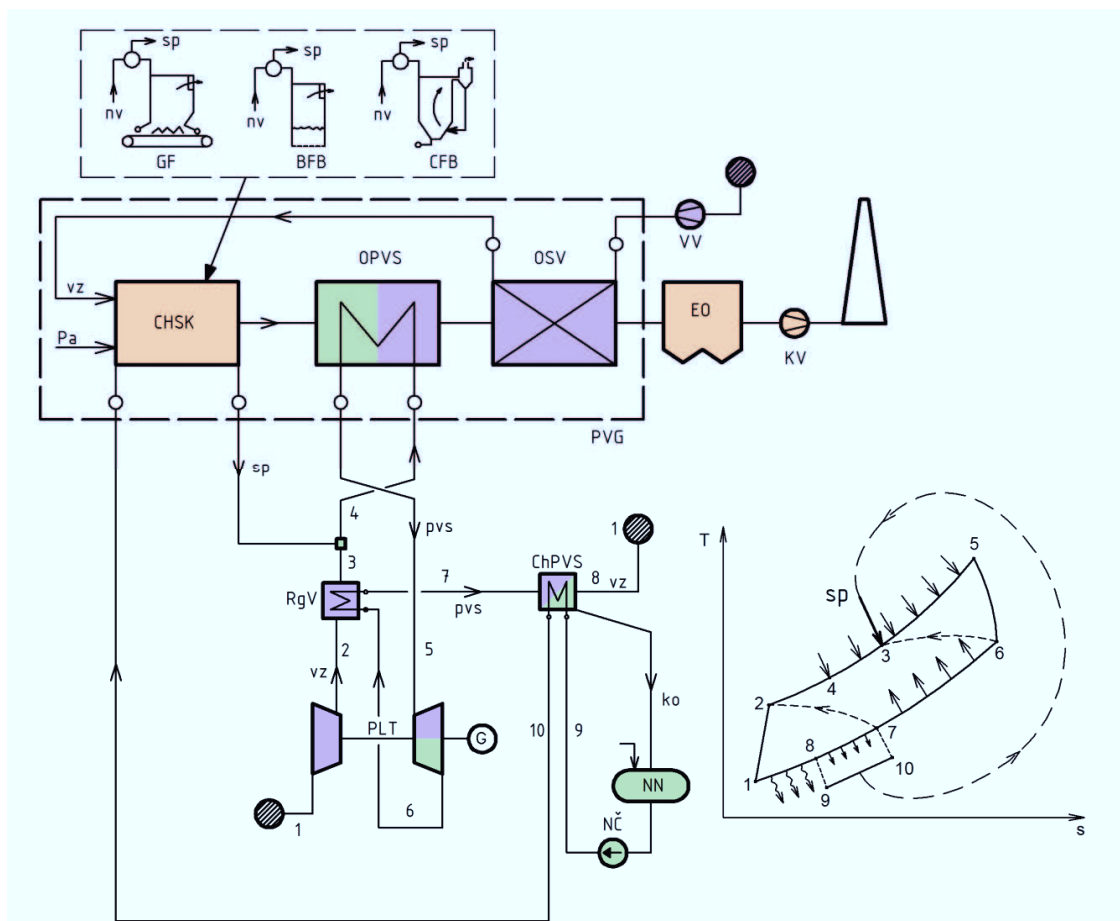
2.1 Flexibilní kogenerační systém FCS

Jak z názvu vyplývá, je zaměřen na kogenerační výrobu energie, ovšem tyto jednotky jsou koncepčně řešeny pro výrobu elektřiny, ale s možností jednoduše realizovat současně i dodávku tepla, a to od minimálního výkonu, např. od nuly, až do požadovaného maxima. U těchto jednotek tedy nemusí být (resp. není) dodávka elektřiny podmíněna dodávkou tepla. Obecně platí, že při dodávce tepla lze volit teplonosné médium (pára, voda), velikost tepelného výkonu i teplotní úroveň, jsou možné i různé kombinace.

Tento systém může být dodáván ve dvou provedeních, a to jako:

- menší jednotky s plynovou turbínou s regenerací tepla
- větší jednotky s kombinovaným Braytonovým a Rankinovým-Clausiovým cyklem

FCS s plynovou turbínou s regenerací tepla při spalování biomasy je naznačen na obrázku 4. Podle uvedeného zapojení se biomasa (samostatně) spaluje v klasické chlazené spalovací



LEGENDA:

EO - elektrostat. odlučovač	Pa - palivo
CHSK - chlazená spalovací komora	PLT - plynová turbína
ChPVS - chladič parovzd. směsi	PVG - parovzduchový generátor
ko - kondenzát	pvs - parovzduchová směs
KV - kouřový ventilátor	RgV - regenerační výměník
NČ - napájecí čerpadlo	sp - sytá pára
NN - napájecí nádrž	VV - vzduchový ventilátor
OPVS - ohřívák parovzd. směsi	vz - vzduch
OSV - ohřívák spalovacího vzduchu	

Obr. 4 Jednotka s plynovou turbínou s regenerací tepla [1]

komoře CHSK s ohništěm roštovým GF nebo fluidním s bublinkovou fluidní vrstvou BFB, případně s cirkulující fluidní vrstvou CFB. Samozřejmě, že lze použít i vhodné ohniště se spolu spalováním nebo s přídavným spalováním uhlí a biomasy. Vzduch pro spalování se

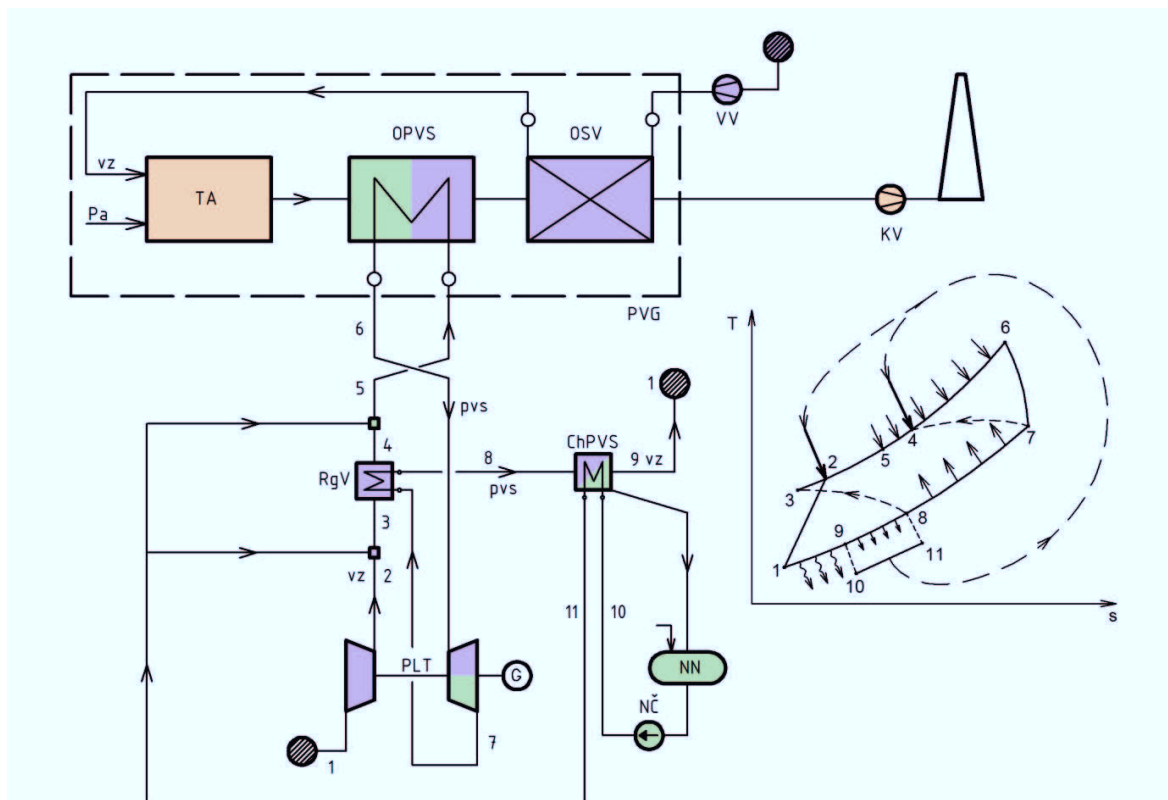
předeheřívá spalínami v ohříváku spalovacího vzduchu OSV, spaliny se čistí v elektrostatickém odlučovači EO. Vzduch *vz* z kompresoru plynové turbíny PLT se předeheřívá v regeneračním výměníku RgV parovzduchovou směsí *pvs* vystupující z plynové turbíny PLT a mísí se se sytou párou *sp* vystupující z výparníku spalovací komory CHSK. Parovzduchová směs z výstupu PLT částečně ochlazená v RgV se dále ochlazuje na výstupní teplotu v chladiči parovzduchové směsi ChPVS – při ochlazování vzniklý kondenzát se shromažďuje v napájecí nádrži NN a používá se jako napájecí voda pro chlazení stěn CHSK. Při spalování uhlí se uvedené schéma nemění, ale kromě uvedených ohnišť na obrázku 4 se může použít práškové ohniště PCF, pro spalování plyných kapalných paliv.

2.2 Flexibilní energetický systém pro využití odpadního tepla HRFES

Lze aplikovat u různých tepelných agregátů pro využití jejich odpadního tepla k výrobě elektřiny, případně ke kogenerační výrobě energie – i v tomto případě platí, že dodávka elektřiny není vázána na dodávku tepla. Možné schéma zapojení je znázorněno na obrázku 5.

Vzduch na výstupu z kompresoru plynové turbíny PLT se ochladí vstřikem kondenzátu *II* na vstupní teplotu *3* do regeneračního výměníku RgV a vzniklá parovzduchová směs *pvs* se po ohřátí v RgV na teplotu *4* opět vstřikem kondenzátu *II* ochladí na vstupní teplotu *5* parovzduchové směsi do ohříváku parovzduchové směsi OPVS. V tomto se ohřeje spalínami z tepelného agregátu TA na pracovní teplotu *6* parovzduchové směsi plynové turbíny PLT a po expanzi se parovzduchová směs o teplotě *7* ochladí v regenerativním výměníku RgV na výstupní teplotu *8*, která se dále v chladiči parovzduchové směsi ChPVS sníží na výstupní teplotu *9* a vypouští se do ovzduší. Jako chladicí médium v ChPVS se použije vstřikovaný kondenzát *II*.

Pokud má TA odparné chlazení, tak vyrobená sytá pára se v oběhu využije, smíchá se s parovzduchovou směsí před nebo za regenerativním výměníkem RgV.



LEGENDA:

ChPVS – chladič parovzd. směsi
KV – kouřový ventilátor
NN – napájecí nádrž
OPVS – ohřívák parovzd. směsi
OSV – ohřívák spal. vzduchu
Pa – palivo
PLT – plynová turbína

PVG – parovzduchový generátor
pvs – parovzduchová směs
RgV – regenerační výměník
TA – tepelný agregát
VV – vzduchový ventilátor
vz – vzduch

Obr. 5 Zapojení pro využití odpadního tepla [1]

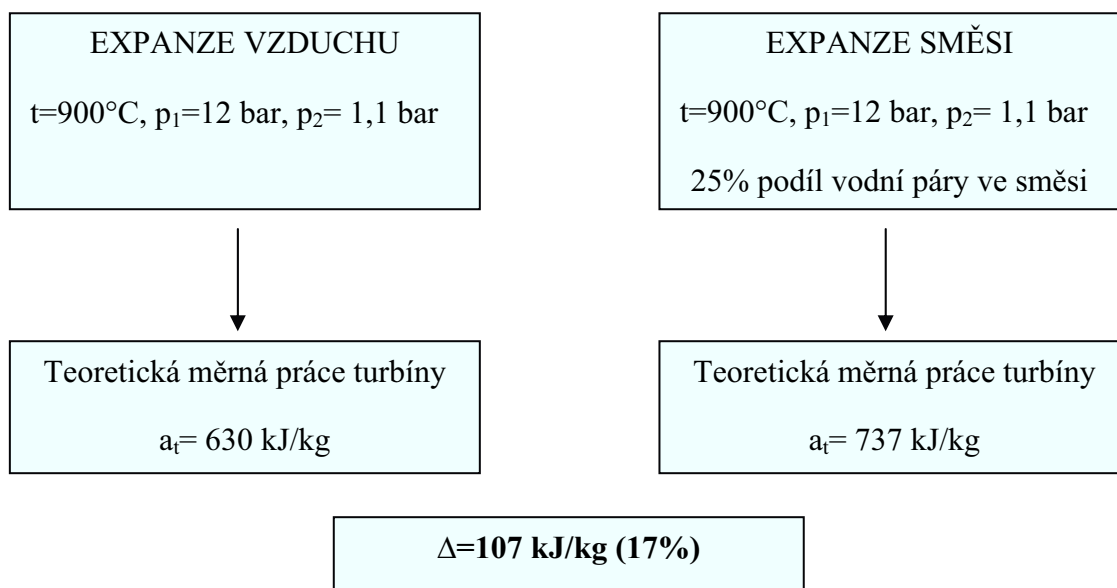
2.3 Kombinovaný cyklus se spalováním uhlí CCCC

Využívá kombinovaný Braytonův a Rankinův-Clausiusův parní cyklus u velkých elektrárenských bloků, možné jsou podkritické i nadkritické parametry páry. Základní schéma zapojení je podobné, jako je schéma na obrázku 1.

Výhodou systému CCCC je, že je kompatibilní (není tedy konkurenční) jak se současnými elektrárenskými bloky s podkritickými i nadkritickými parametry tak i nově vyvíjenými systémy, jako jsou např. IGCC nebo tzv. bezemisní technologie CCS (Carbon Capture and Storage), které dnes představuje tzv. Oxyfuel Proces nebo technologie zachycování CO_2 před spalováním (pre-combustion capture) či po spalování (post-combustion capture).

Přínos parovzduchové směsi na energetický oběh

Na schématu 1 můžete vidět termodynamickou průceschopnost parovzduchové směsi.



Schem. 1 Přínos parovzduchové směsi

Pokud bychom chtěli dosáhnout stejného efektu jen při expanzi vzduchu (bez podílu vodní páry), musel by být tento vzduch ohřátý na teplotu 1090°C .

Shrnutí informací FES

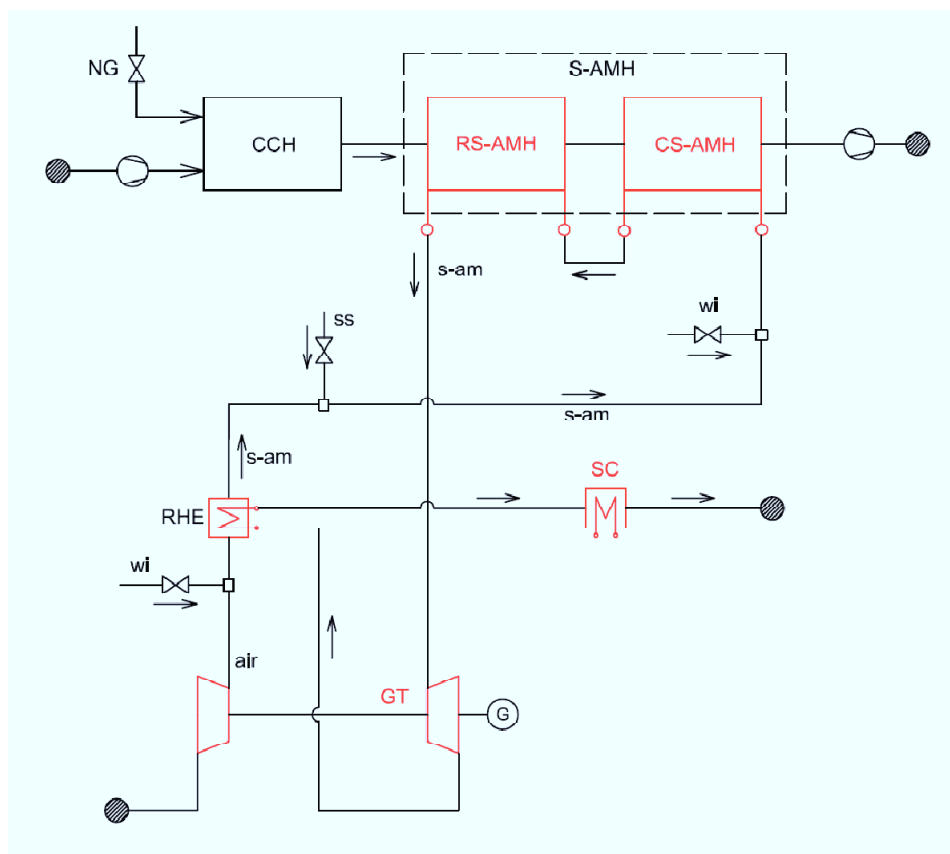
Flexibilní energetický systém FES:

- **Umožňuje** aplikovat Braytonův cyklus nebo kombinovaný Braytonův a Rankinův-Clausiiův cyklus při:
 - spalování tuhých paliv, jako je:
 - uhlí
 - biomasa
 - alternativní paliva
 - spalování plyných a kapalných paliv nevhodných pro plynové motory
 - využití odpadního tepla
- **Umožňuje**
 - klasický elektrárenský provoz
 - kogenerační provoz
 - nezávislá dodávka elektřiny na dodávce tepla
 - dodávka tepla dle potřeby

- **Používá** pro spalování a dodržení podmínek ochrany životního prostředí:
 - osvědčené technologie
 - perspektivně i nově vyvíjené technologie – včetně separace CO₂
- **Dosáhne se** vyšší hmotnostní průtok plynovou turbínou
 - sníží se kompresní práce
 - zvýší se disponibilní práce turbíny
- **Zvýší se** celková účinnost transformace primární energie

3 Demonstrační jednotka flexibilního energetického systému

Navrhovaná demonstrační jednotka (viz. Obrázek 6) bude sloužit k ověření chování energetického cyklu pracujícího s nepřímým ohřevem parovzduchové směsi a jeho hlavních vyvíjených částí. Protože předmětem vývoje FES není technologie spalování uvažovaných paliv, bude jako zdroj spalín pro demonstrační jednotku použit klasický plynový hořák produkující spaliny o parametrech odpovídající spalínám za ohništěm spalovacího zařízení. Použitý plynový hořák doplněný o nechlazenou komoru CCH bude umožňovat jak regulaci výstupní teploty spalín, tak i regulaci průtoku.

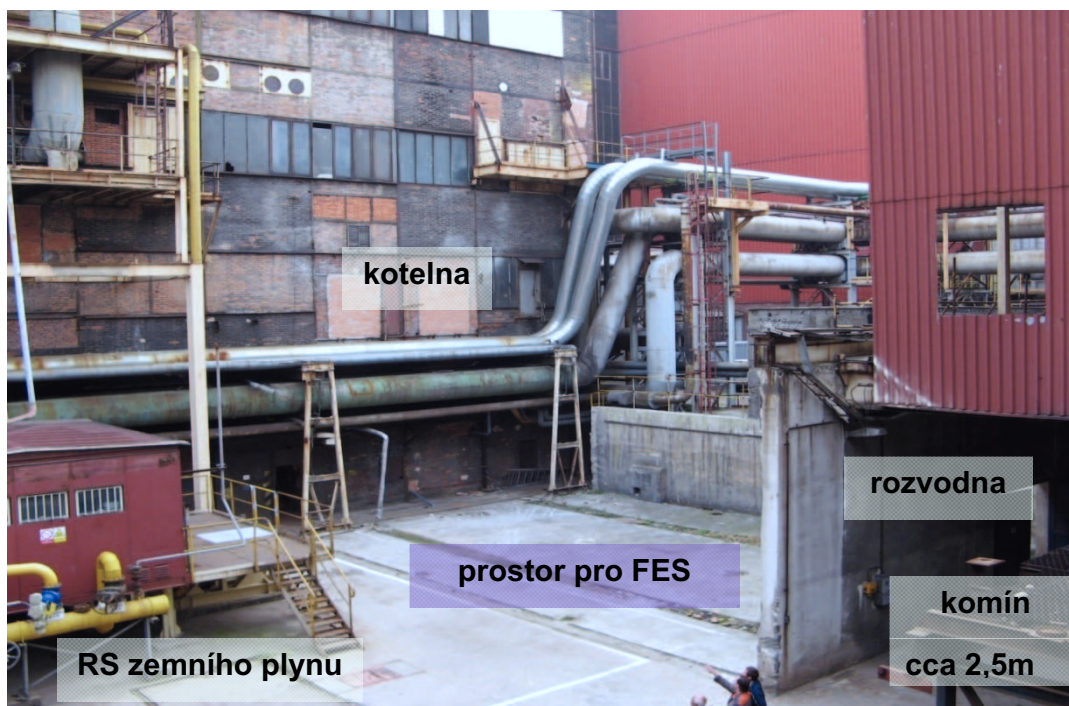


Obr. 6 Základní schéma demonstrační jednotky [8]

Vlastní parovzduchová směs **s-am** se vytvoří tak, že se do komprimovaného vzduchu přivede sytá pára **ss** a tlaková demineralizovaná voda **wi** – koncentrace páry v parovodní směsi se bude řídit množstvím přivedené syté páry **ss** a množstvím jednotlivých vstříků **wi** před výměníky tepla **RHE** a **S-AHM**. Tento způsob umožňuje proměnnou změnu parametrů parovzduchové směsi a tedy prošetření vlivu zastoupení vodní páry na oběhu dvoustupňové expanzní plynové turbíny. Vzniklá parovzduchová směs **s-am** se na potřebnou teplotu ohřeje v sériově řazeném sálavém a konvekčním ohříváku parovzduchové směsi **RS-AMH**, **CS-AMS**. Pro využití tepla vyexpandované parovzduchové směsi bude za druhým stupněm plynové turbíny zařazen rekuperační výměník **RHE**. Po předání tepla ve výměníku **RHE** bude *pvs* zavedena do separačního kondenzátoru **SC**. Na obrázku 6 jsou červeně vyznačeny hlavní vyvíjené části.

3.1 Umístění demonstrační jednotky

Lokalita pro umístění demonstrační jednotky byla volena s ohledem na zajištění provozních medií nutných pro provoz zařízení. O spolupráci a poskytnutí lokality byla požádána společnost ČEZ, a Teplárna Vítkovice, která nabídla pro výstavbu demonstrační jednotky prostor o rozměrech přibližně 200 m², vytvořený po demontáži zastaralých elektrostatických odlučovačů. Tento prostor je patrný z obrázku 7.



Obr. 7 Lokalita umístění demonstrační jednotky FES [8]

Pro provoz demonstrační jednotky je zapotřebí zemní plyn, nízkotlaká pára, demineralizovaná a chladicí voda, technologický a přístrojový vzduch a vyvedení elektrického výkonu do sítě. Spaliny a vyexpandovaná parovzduchová směs budou zavedeny do stávajícího komína, který se nachází v bezprostřední blízkosti zvolené lokality.

3.2 Řešení projektu

Hlavním cílem prvního fáze řešení projektu bylo především zpracování matematického modelu oběhu flexibilního energetického systému v zapojení demonstrační jednotky pracující s parovzduchovou směsí ohřívanou spaliny při zohlednění dějů probíhajících při kompresi v axiálně radiálním dynamickém kompresoru, při expanzi ve dvou axiálních stupních a při sdílení tepla mezi teplosměnnými médii.

Základním krokem při řešení této etapy bylo zpracování fyzikálních vlastností (termodynamických a transportních) parovzduchové směsi. Pro rychlý a přehledný výpočet byl vypracován program umožňující stanovení fyzikálních vlastností směsi ve verzi PVS1.0.exe. Jde o výpočet entalpie, hustoty, dynamické viskozity a tepelné vodivosti s omezením tlaku směsi 20 bar. Parovzduchová směs je charakteristická svým víceparametrovým zadáváním. Mimo teploty a tlaku směsi je nutné zadat i zastoupení procesní páry ve směsi. Výpočtový program PVS 1.0.exe slouží nejenom na pracovišti hlavního řešitele projektu, ale i na pracovištích spoluřešitelů projektu k sjednocení výsledků dílčích výpočtů. Tvorba vlastního matematického modelu oběhu demonstrační jednotky probíhala s uvažováním reálného zastoupení procesní páry v parovzduchové směsi. Hodnota zastoupení páry ve směsi vyplynula z předpokladu skutečného oběhu FES a to při spalování primárního paliva. Při reálném zapojení „Flexibilního energetického systému“ bude ohništěm produkováno množství páry odpovídající 25 % zastoupení ve směsi. Tento režim byl zvolen jako režim jmenovitý, přičemž minimální hodnotou zastoupení procesní páry ve směsi v rámci výzkumném měření na demonstrační jednotce bude 15 % a maximální hodnotou bude 60 %. Při těchto režimech bude analyzován vliv zastoupení vodní páry ve směsi na průceschopnost na turbíně, což představuje stanovení měrné expanzní práce a vnitřní účinnosti turbíny. Matematické modely byly vytvořeny v programech EES (Engineering Equation Solver) a Thermoflex.

Vývoj separačního kondenzátoru

Výzkum a vývoj separačního kondenzátoru se zaměřuje především na stanovení přestupových součinitelů při separaci vodní páry z parovzduchové směsi při uvažovaném zastoupení 15 až 60 % a odpovídající saturační teplotě 69 až 94 °C.

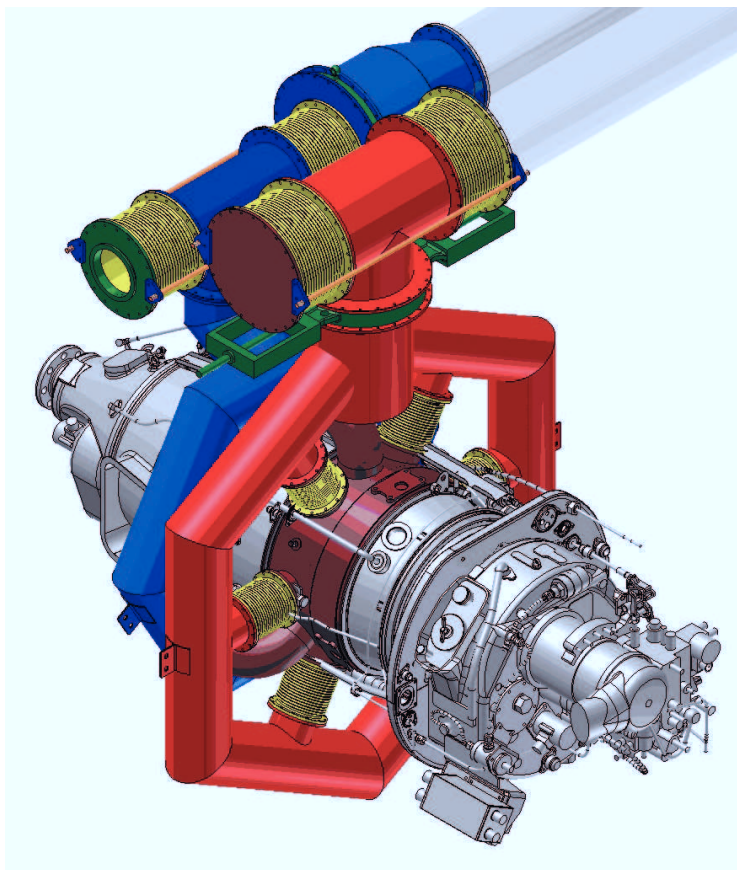
K výzkumu sdílení tepla bude využito přístrojové vybavení experimentální tratě vybudované na VŠB pro výzkum a vývoj separačního parogenerátoru. Dané experimentální zařízení bude z části využito, resp. dané experimentální zařízení bude doplněno o další vybavení tak, aby vznikl ucelený systém, který zajistí přípravu parovzduchové směsi v požadovaném rozpětí teploty a nasyceném stavu a následně pak její ochlazení na teplosměnných plochách testovaných výměníků doprovázené kondenzací vodní páry. Procesy při kondenzaci budou monitorovány a získané výsledky budou využity ke stanovení přestupových součinitelů a volbě vhodné koncepce reálného separačního kondenzátoru, jehož řešení bude ověřováno provozními zkouškami na demonstrační jednotce.

Úprava turbosoustrojí pro nepřímý ohřev

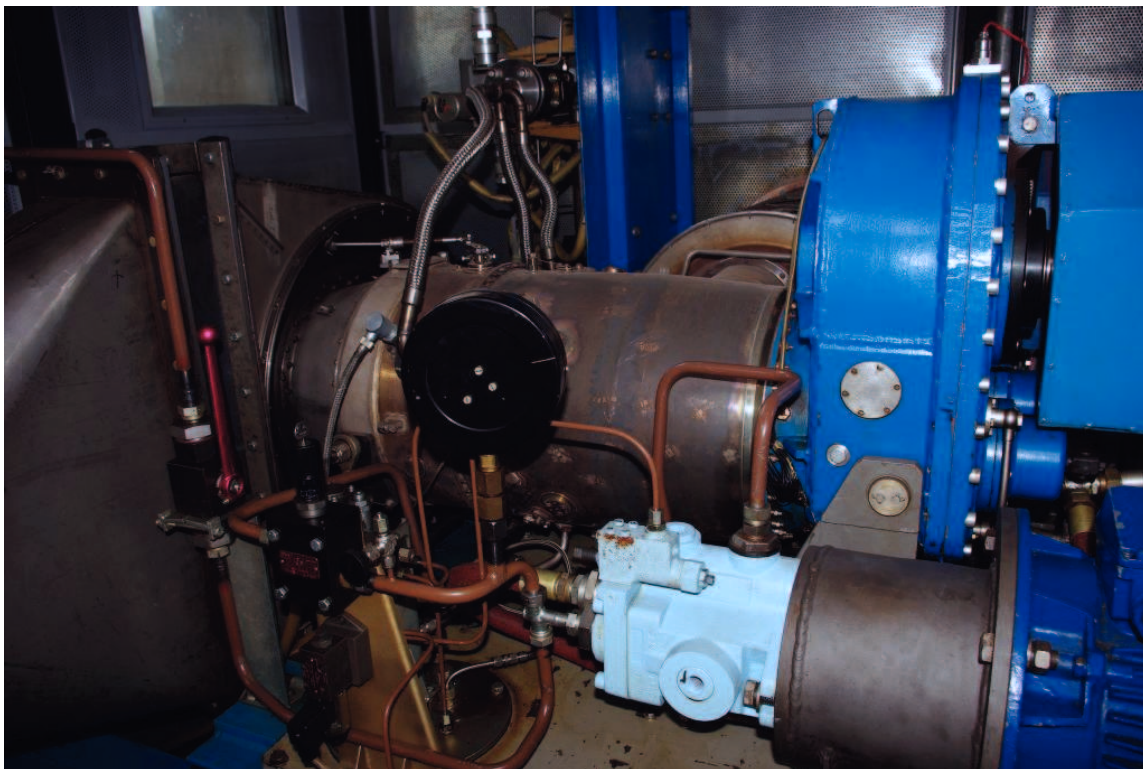
Základ turbosoustrojí pro demonstrační jednotku FES tvoří plynová turbína Walter M601 s vnitřní spalovací komorou.

Cílem této etapy je upravit jednotku tak, aby umožňovala nepřímý ohřev parovzduchové směsi při absenci vnitřní spalovací komory. Energetická jednotka Walter M601 se skládá z turbínového motoru, momentové spojky, převodovky, elektrického generátoru, spouštěcího hydraulického a mazacího systému. Energetická jednotka je umístěna v akustickém kontejneru. Předběžné řešení přestavby turbíny na nepřímý ohřev je uvedeno na obrázku 8 a 9. Přestavba turbíny na nepřímý ohřev obnáší úpravu statoru, řešení vyvedení komprimovaného vzduchu, řešení zavedení parovzduchové směsi do turbínových stupňů. V rámci řešení této etapy byl proveden předběžný návrh úprav pro nepřímý ohřev a zpracován matematický model (CFD) zaměřený na vyčíslení tlakových ztrát v systému vyvedení komprimovaného vzduchu mimo těleso jednotky a zavedení parovzduchové směsi do turbínových stupňů. Současně s tím bylo provedeno posouzení pevnostního namáhání navrhovaných částí. Modrý kolektor na obrázku 8 představuje vývod komprimovaného vzduchu mimo těleso turbíny a červený kolektor přívod parovzduchové směsi o vysoké teplotě do turbínových stupňů.

Cílem analýz s využitím numerického modelování bylo snížení tlakové ztráty kolektorů vývodu vzduchu a přívodu směsi na technicky přijatelnou hodnotu s ohledem na konstrukční možnosti motoru, prostorové nároky, výrobitelnost a generovaný výkon. S využitím sestaveného matematického modelu byly provedeny tepelně bilanční výpočty oběhu s turbínou Walter M601 a nepřímým ohřevem pracovního media ve vysokoteplotních výměnících. Do výpočtů byly zaneseny doposud známé hodnoty tlakových ztrát kolektorů a předpokládané tlakové ztráty na výměnících. Tyto výpočty sloužily k určení parametrů pro návrh systémů ohřevu pracovního media na tlakové a beztlakové straně a způsobu regulace. Na základě analýzy tlakových ztrát a posouzení dílů z pohledu pevnostního namáhání a příslušných norem budou v navazující části řešení projektu zpracovány výkresy konstrukčních úprav dílů turbíny Walter M601 včetně propojovacího potrubního systému s výměníkem.



Obr. 8 Předběžný 3D model řešení přestavby jednotky pro nepřímý ohřev [8]



Obr. 9 Turbovrtulový motor Walter M 601 [8]

Vývoj vysokoteplotního ohříváku parovzduchové směsi

Výzkum a vývoj konvekčního a radiačního ohříváku parovzduchové směsi zahrnoval v roce 2009 návrh vhodné koncepce, s ohledem na požadované výkonové parametry, pracovní prostředí, vzájemné posouzení navrhovaných koncepcí, analýzu materiálového řešení výměníku, volbu omezujících kritérií, realizaci optimalizačních výpočtů a konstrukčního řešení teplosměnné plochy výměníku s ohledem na přípustné hodnoty tlakových ztrát na straně medií.

V rámci této etapy byla na pracovišti hlavního řešitele projektu zpracována úvodní analýza materiálového řešení vysokoteplotního výměníku parovzduchové směsi. Úkolem bylo na základě dostupných informací definovat jakosti materiálů vyznačující jak žáruvzdorností, tak především vysokou žárupevností, tedy dostatečnými creepovými vlastnostmi při pracovní teplotě kovu teplosměnné plochy 980 °C. Dalšími požadavky kladenými na návrh materiálu je svařitelnost, dostupnost a zajistitelnost. Daný materiál musí navíc dále vykazovat dostatečnou odolnost proti vysokoteplotní oxidační a chloridové korozi.

Pro dosažení požadované výstupní teploty parovzduchové směsi 835 °C bude výměník vyroben z různých druhů materiálů zahrnujících kategorie vysokolegovaných materiálů do

teploty 650 °C (legovaných chrómem, molybdenem, vanadem či wolframem) a dále pak austenitických materiálů do teploty 750 °C. Závěrečnou, teplotně nejvíce exponovanou část výměníku, bude nutné vyrobit z niklových žárupevných slitin. Navrhovaný výměník bude pracovat v rozsahu koncentrací procesní páry v parovzduchové směsi 15 – 60 %_{hm.}, přičemž jmenovitou koncentrací bude přibližně 25 %.

V průběhu řešení projektu byla provedena analýza možných konstrukčních řešení výměníků, bylo provedeno vzájemné zhodnocení koncepcí výměníku a zvolena koncepce, kterou se bude další řešení ubírat. Již dříve byl pro zvolenou koncepci výměníku proveden výpočet v deseti variantách, který nabízí různé hodnoty tlakových ztrát na straně medií, avšak požaduje odlišné plochy výměníku, konstrukční rozměry a rozměry trubek teplosměnné plochy. K dalšímu posuzovanému parametru, které musí finální řešení výměníku splňovat, je přípustná hodnota povrchové teploty s ohledem na creepové vlastnosti materiálu. Navržené materiály je nutné detailně posoudit, a to s ohledem na jejich zajistitelnost, výrobitelnost a finanční možnosti projektu.

Vývoj rekuperačního ohříváku

Rekuperační výměník tepla bude pracovat na jedné straně s komprimovanou parovzduchovou směsí a na straně druhé s expandovanou parovzduchovou směsí.

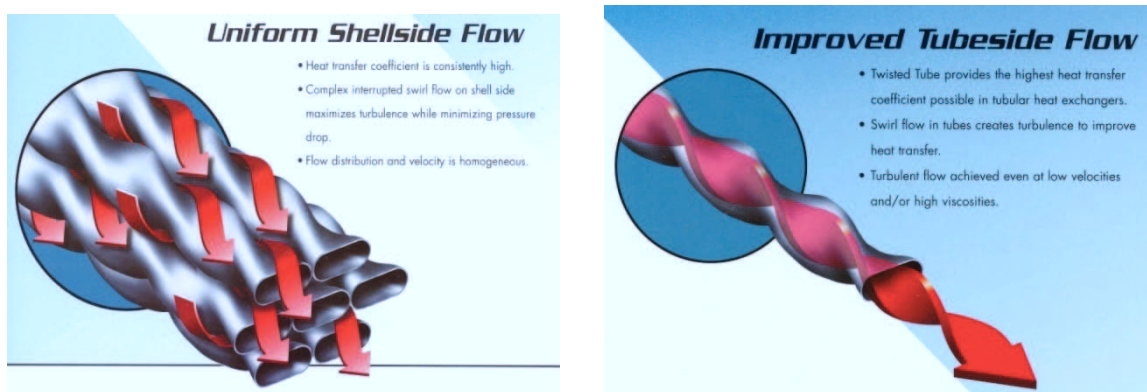
Řešení výměníku je aktuálně rozpracováno ve dvou alternativách splňující přípustné hodnoty tlakových ztrát na straně pracovních médií, vysokou účinnost, dosahující přenesený tepelný výkon při optimální velikosti teplosměnné plochy výměníku a jeho hmotnosti. Do úvahy byla brána i kompaktnost řešení a následná technologie výroby. Zkoumaný rekuperační výměník bude využívat intenzifikační prvky na bázi Twisted Tubes (TT). V rámci projektu bude provedeno posouzení základních parametrů rekuperačního výměníku využívajícího technologii TT s rekuperačním výměníkem využívající klasické řešení, a to segmentový přepážkový systém.

Zaměření výzkumu a vývoje rekuperačního výměníku tepla:

- použití technologie a koncepce Twisted Tubes (TT),
- vývoj a sestavení výpočtové metodiky pro TT s parovzduchovou směsí,
- volba koncepce a uspořádání výměníku za účelem dosažení nízkých hodnot tlakových ztrát,
- výzkum geometrie profilu trubky TT a jejího vlivu na sdílení tepla a hodnoty tlakových ztrát,

Rekuperační výměník využívající Twisted Tube (TT) nabízí oproti klasickým trubkovým výměníkům stejných rozměrů nebo deskovým výměníkům dosažení nižších tlakových ztrát, případně vůči klasickým trubkovým výměníkům stejných výkonů dosažení menších rozměrů, hmotnosti a vyšší kompaktnosti. Základním prvkem TT koncepce je použití teplosměnných ploch tzv. zkroucené trubky (Twisted Tubes) viz obrázek 10. Jednotlivé trubky dosedají přímo na sebe, což přispívá k zabránění kmitání jednotlivých trubek spojeného s generováním vibrací a akustického hluku. Tvar teplosměnné plochy je určen zejména délkou stoupání, zploštěním a průměrem trubičky viz obrázek 10.

Tvar TT je volen tak, aby vznikající proudění bylo turbulentní. Turbulentní proudění zvyšuje přestupy tepla a přispívá tak ke zmenšení rozměrů výměníku a zastavěného prostoru. Volba různého zploštění teplosměnných trubek umožňuje nastavit vzájemný poměr součinitelů přestupu tepla na obou stranách proudění a tím optimálně volit výsledný součinitel prostupu tepla pro různé hmotnostní průtoky pracovních médií, a to ve vztahu k celkovému průtočnému průřezu.



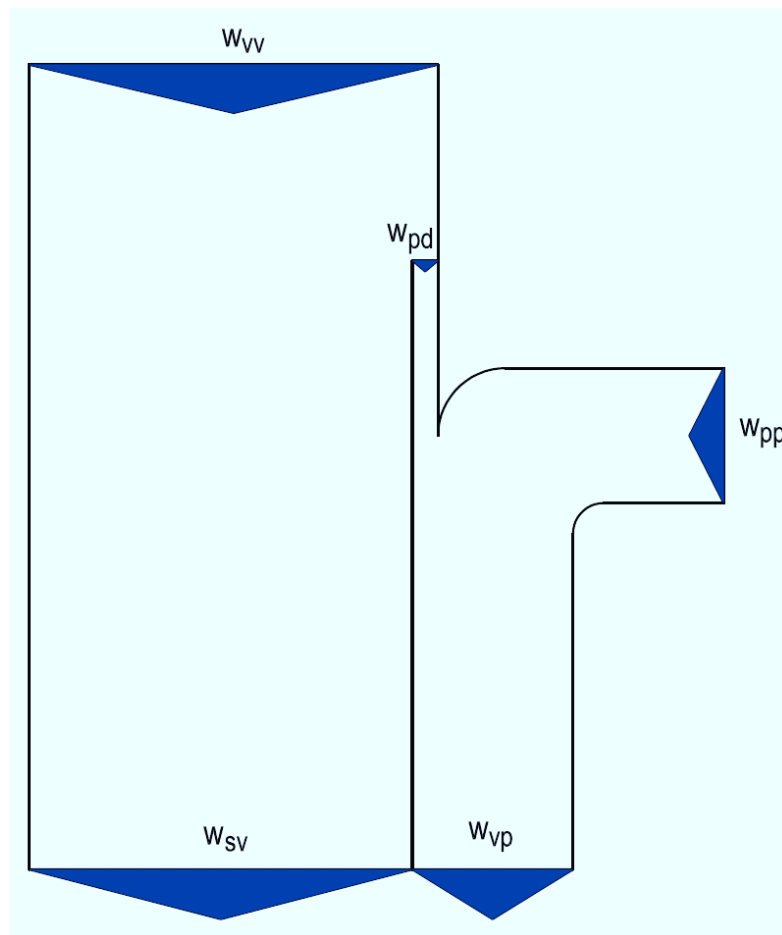
Obr. 10 Provedení trubek rekuperačního výměníku tepla. [8]

4 Výpočet termodynamických a transportních vlastností parovzduchové směsi

Pro požadavky FES cyklu je nutné stanovit termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi. Parovzduchová směs je definována teplotou 500 °C, celkovým tlakem 12 bar a množstvím přiváděné procesní páry 20 %. Ve výpočtu se uvažuje s reálným vlhkým vzduchem nasávaným kompresorem o teplotě 15 °C, barometrickém tlaku 0,98 bar a relativní vlhkosti 60 %.

Definice parovzduchové směsi

Parovzduchová směs, zkráceně *pvs* je směsí reálného vlhkého vzduchu stlačeného kompresorem a procesní páry. Hned na začátku je třeba definovat pojem vodní pára a procesní pára. Procesní páru (w_{pp}) lze definovat jako páru, která vzniká v důsledku nepřímého chlazení (chlazená spalovací komora kotle) nebo páru která vzniká v důsledku přímého chlazení (vstřík vody do vzduchu, popř. již přímo do *pvs*), které nám bude určovat koncentraci procesní páry v parovzduchové směsi, avšak vlastní výpočty termodynamických a transportních vlastností *pvs* budou provedeny se skutečnou koncentrací vodní páry w_{vp} . Označení vodní pára tedy znamená souhrnné množství procesní páry a vlhkosti, která je obsažena ve vzduchu. Vodní pára v *pvs* může existovat v přehřátém stavu, v případě dosažení rosného bodu (daného parciálním tlakem) ve stavu nasyceném. V případě nasyceného stavu odpovídá množství vodní páry v *pvs* právě parciálnímu tlaku vodní páry. Definice pojmů vodní a procesní pára je zřejmá z obrázku Obr. 11. Množství vodní páry je tedy větší o vlhkost obsaženou ve vzduchu.



Obr. 11 Definice parovzduchové směsi

4.1 Stanovení hmotnostních koncentrací suchého vzduchu a vodní páry

Měrná vlhkost nasávaného vzduchu:

(teplotě 15 °C odpovídá parciální tlak páry na mezi sytosti 0,01760 bar, tato hodnota je převzata z databáze programu EES)

$$d = \frac{r_{sv} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{pp}''}{p_c - \varphi \cdot p_{pp}''}}{r_{vp}} \quad (3.1)$$

$$d = \frac{287,1}{461,5} \cdot \frac{0,6 \cdot 0,01706}{0,98 - 0,6 \cdot 0,01706}$$

$$\underline{\underline{d = 0,006565 \text{ kg.kg}^{-1}}}$$

Kde: r_{sv} ...měrná plynová konstanta suchého vzduchu [kJ.kg⁻¹.K]

r_{sv} ...měrná plynová konstanta vodní páry [kJ.kg⁻¹.K]

φ ...relativní vlhkost vlhkého vzduchu [1]

p_{pp} ...parciální tlak páry na mezi sytosti [bar]

Koncentrace páry ve vlhkém vzduchu:

$$w_{pd} = \frac{d}{1+d} \quad (3.2)$$

$$w_{pd} = \frac{0,006565}{1+0,006565}$$

$$\underline{\underline{w_{pd} = 0,006522 \text{ kg.kg}^{-1}}}$$

Tomuto odpovídá koncentrace vodní páry w_{vp} v parovzduchové směsi:

$$w_{vp} = (1 - w_{pp}) \cdot w_{pd} + w_{pp} \quad (3.3)$$

$$w_{vp} = (1 - 0,2) \cdot 0,006522 + 0,2$$

$$\underline{\underline{w_{vp} = 0,2052 \text{ kg.kg}^{-1}}}$$

Kde: w_{pp} ...množství přiváděné procesní páry [1]

A koncentrace suchého vzduchu w_{sv} v parovzduchové směsi:

$$w_{sv} = 1 - w_{vp}$$

$$w_{sv} = 1 - 0,2052 \quad (3.4)$$

$$\underline{\underline{w_{sv} = 0,7948 \text{ kg.kg}^{-1}}}$$

4.2 Stanovení parciálních tlaků suchého vzduchu a vodní páry

Parciální tlak vodní páry p_{vp} v p_{vs} :

$$p_{vp} = p_c \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \quad (3.5)$$

$$p_{vp} = 12 \cdot \left[1 - \frac{0,7948 \cdot 287,1}{0,7948 \cdot 287,1 + 0,2052 \cdot 461,5} \right]$$

$$\underline{\underline{p_{vp} = 3,52 \text{ bar}}}$$

Kde: p_c ...celkový tlak parovzduchové směsi [bar]

Dále je parciální tlak suchého vzduchu p_{sv} :

$$\begin{aligned} p_{sv} &= p_c - p_{vp} \\ p_{sv} &= 12 - 3,52 \\ \underline{\underline{p_{sv} &= 8,48 \text{ bar}}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

4.3 Entalpie parovzduchové směsi

(entalpie vodní páry i_{vp} při teplotě směsi a parciálním tlaku je 3486 kJ.kg^{-1} , tato hodnota je převzata z databáze programu EES)

$$\begin{aligned} i_{sm} &= w_{sv} \cdot i_{sv} + w_{vp} \cdot i_{vp} \\ i_{sm} &= 0,7948 \cdot 522 + 0,2052 \cdot 3486 \\ \underline{\underline{i_{sm} &= 1130,34 \text{ kJ.kg}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Entalpie suchého vzduchu i_{sv} :

$$\begin{aligned} i_{sv} &= c_{sv} /_0^{t_{sm}} \cdot t_{sm} \\ i_{sv} &= 1,044 \cdot 500 \\ \underline{\underline{i_{sv} &= 522 \text{ kJ.kg}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Kde: c_{sv} ...střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu [kJ.kg^{-1}]

t_{sm} ...teplota parovzduchové směsi [$^{\circ}\text{C}$]

4.4 Hustota parovzduchové směsi

Hustota ρ_{vs} při celkovém tlaku a teplotě p_{vs} :

$$\begin{aligned} \rho_{sm} &= \frac{p_{sv}}{r_{sv} \cdot T_{sm}} + \frac{p_{vp}}{r_{vp} \cdot T_{sm}} \\ \rho_{sm} &= \frac{8,48 \cdot 10^5}{287,1 \cdot 773,15} + \frac{3,52 \cdot 10^5}{461,5 \cdot 773,15} \\ \underline{\underline{\rho_{sm} &= 4,807 \text{ kg.m}^{-3}}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Kde: T_{sm} ...teplota parovzduchové směsi [K]

Hustota pvs při normálních podmínkách:

$$\rho_{sm,N} = \rho_{sm} \cdot \frac{p_N}{p_c} \cdot \frac{T_{sm}}{T_N} \quad (3.10)$$

$$\rho_{sm,N} = 4,807 \cdot \frac{1,01325}{12} \cdot \frac{773,15}{273,15}$$

$$\underline{\underline{\rho_{sm,N} = 1,149 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

Kde: p_N ...tlak za normálních podmínek

T_N ...teplota za normálních podmínek

4.5 Tepelná vodivost parovzduchové směsi

$$\lambda_{sm} = \frac{y_{sv} \cdot \lambda_{sv} \cdot M_{sv}^{1/3} + y_{vp} \cdot \lambda_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}}{y_{sv} \cdot M_{sv}^{1/3} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}} \quad (3.11)$$

$$\lambda_{sm} = \frac{0,7067 \cdot 55,82 \cdot 10^{-3} \cdot 28,96^{1/3} + 0,2933 \cdot 67,15 \cdot 10^{-3} \cdot 18,02^{1/3}}{0,7067 \cdot 28,96^{1/3} + 0,2933 \cdot 18,02^{1/3}}$$

$$\underline{\underline{\lambda_{sm} = 58,783 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Kde: y_{sv} ...molární koncentrace suchého vzduchu v pvs [kmol.kmol^{-1}]

y_{vp} ...molární koncentrace vodní páry v pvs [kmol.kmol^{-1}]

λ_{sv} ...tepelná vodivost suchého vzduchu [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

λ_{vp} ...tepelná vodivost vodní páry [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

M_{sv} ...molární hmotnost suchého vzduchu [kg.kmol^{-1}]

M_{vp} ...molární hmotnost vodní páry [kg.kmol^{-1}]

4.6 Viskozita parovzduchové směsi

Dynamická viskozita pvs :

$$\eta_{sm} = \frac{\eta_{vp}}{1 + \Phi_{pv} \cdot \frac{y_{sv}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{sv}}{1 + \Phi_{sv} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{sv}}} \quad (3.12)$$

$$\eta_{sm} = \frac{28,58}{1 + 1,115 \cdot \frac{0,7067}{0,2933}} + \frac{35,92}{1 + 0,8721 \cdot \frac{0,2933}{0,7067}}$$

$$\underline{\underline{\eta_{sm} = 34,128 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}}}$$

Kde: $\Phi_{pv} \dots$ jk jg []

$\Phi_{sv} \dots$ jk jg []

$$\Phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{vp}}{\eta_{sv}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{1/2}} \quad (3.13)$$

$$\Phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{28,58}{35,92} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{28,96}{18,02} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{18,02}{28,96} \right)^{1/2}}$$

$$\underline{\underline{\Phi_{pv} = 1,115}}$$

$$\Phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{sv}}{\eta_{vp}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{1/2}} \quad (3.14)$$

$$\Phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{35,92}{28,58} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{18,02}{28,96} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{28,96}{18,02} \right)^{1/2}}$$

$$\underline{\underline{\Phi_{vp} = 0,8721}}$$

Kinematická viskozita ν_{sm} :

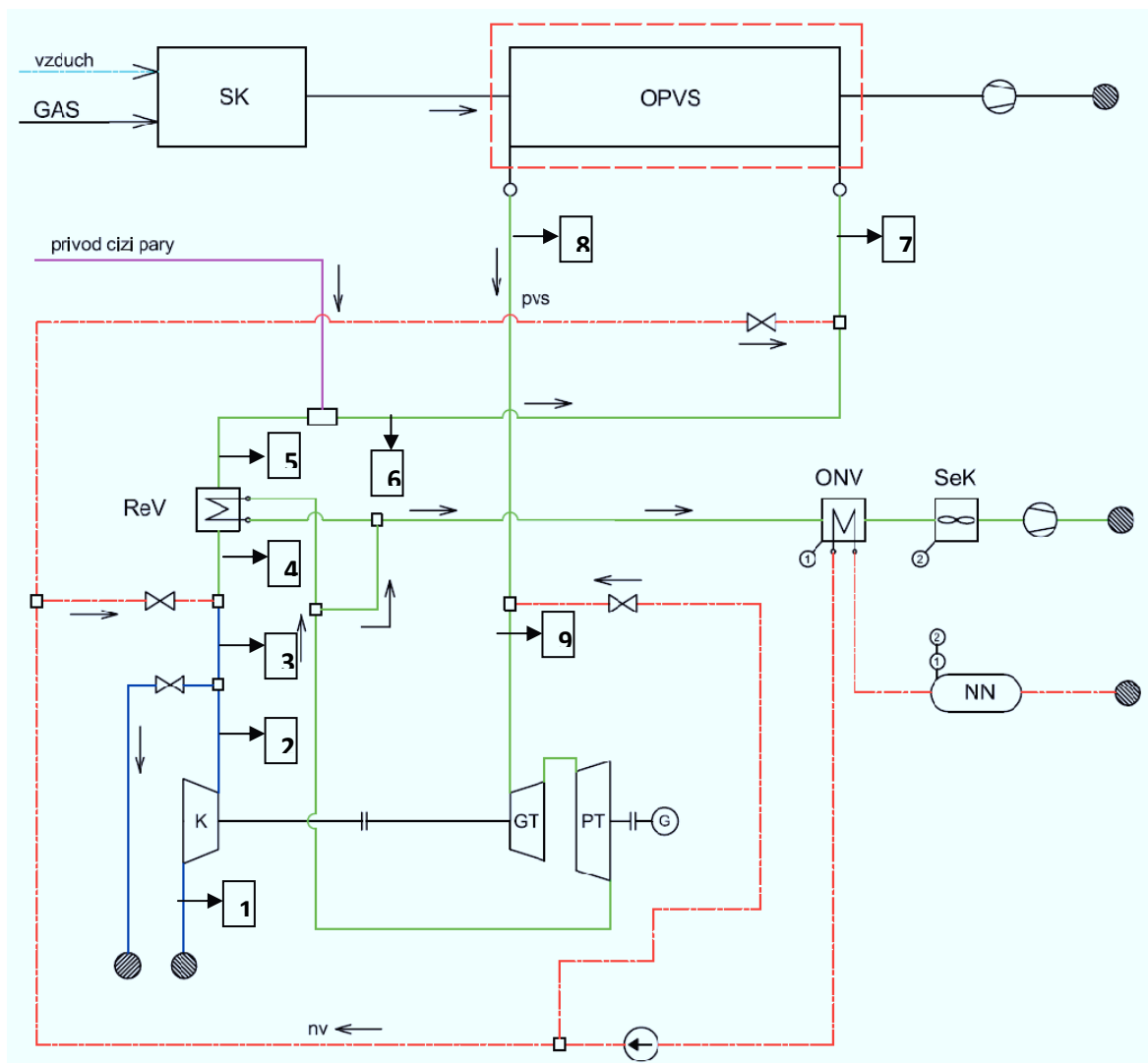
$$\nu_{sm} = \frac{\eta_{sm}}{\rho_{sm}} \quad (3.15)$$

$$\nu_{sm} = \frac{34,128 \cdot 10^{-6}}{4,807}$$

$$\underline{\underline{\nu_{sm} = 7,099 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}}$$

4.7 Určení měrné vlhkosti a entalpie v určitých bodech systému

Podle předchozích výpočtů a pomoci programu EES jsou ve vyznačených místech, jak je vidět na obrázku 12, vypočteny měrné vlhkosti (d_{pd}) a entalpie (i). Výsledky jsou zhrnuty v tab. 1.



Obr. 12 Schéma demonstrační jednotky

Tab. 1

	t_{sm}	p_c	W_{vp}	φ	i	d_{pd}
	[°C]	[bar]	[l]	[%]	[kJ/kg _{pvs}]	[kg.kg ⁻¹]
1	15	0,993	0,006434	60	31,27	0,006476
2	269,1	6,409	0,006434	0,1217	291	0,006476
3	269,1	6,409	0,006434	0,1217	291	0,006476
4	101,6	6,096	0,07238	59,86	277,1	0,07238
5	446,3	6,096	0,07238	59,86	657,7	0,07238
6	375,5	6,096	0,2554	0,1776	963,7	0,2554
7	220,5	6,096	0,3398	9,204	907,1	0,3398
8	835	5,996	0,3398	9,204	1746	0,3398
9	800	5,747	0,3398	9,204	1694	0,3398

5 Ohřívák parovzduchové směsi

Tento vysokoteplotní ohřívák parovzduchové směsi bude koncipován jako svazkový, vícechodý výměník v protiproudem a kombinovaném protiproudem – souproudém zapojení ve vystřídáném hustém uspořádání trubek s křížovým prouděním spalín vně trubek, který je rozdělen do tří sekcí se vstupní, výstupní komorou a dvěma homogenizačními komorami. Celý výměník bude zavěšen na speciálních nechlazených závěsech.

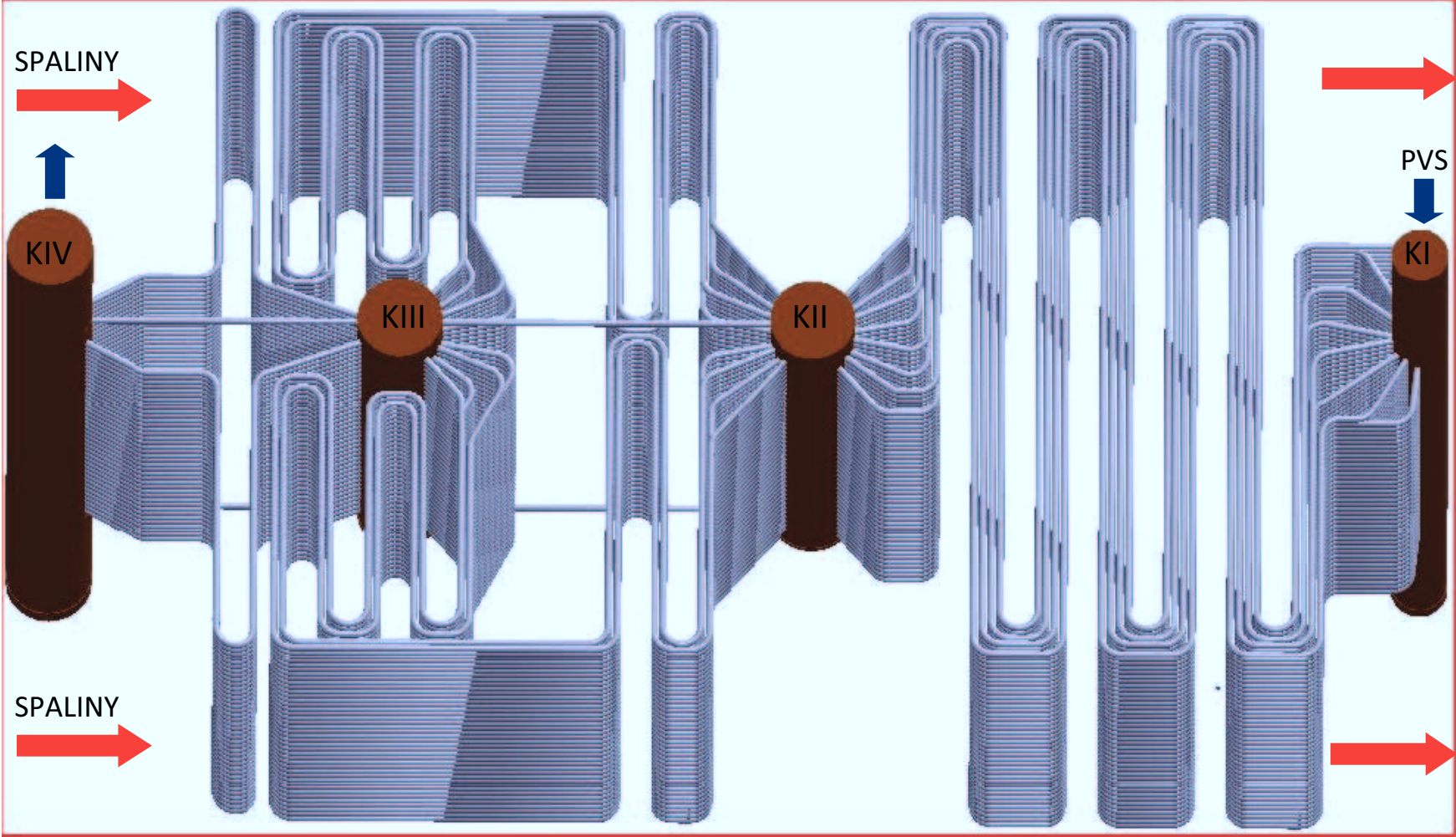
První sekce výměníku je tvořena komorou KI se 156 nátrubky, kterými vstupuje parovzduchová směs do jednovětвовé teplosměnné plochy tvořené čtyřmi řadami trubek a celkovém počtu překřížení 6. První sekce je řešená v protiproudem zapojení. Trubky první sekce jsou zaústěny do komory KII, která zajišťuje homogenizaci teploty, zavádí směs do sekce II prostřednictvím 156 nátrubků a umožňuje technologické spojení trubek první a druhé sekce.

Druhá sekce výměníku je tvořena dvouvětвовou teplosměnnou plochou dvěma řadami trubek v kombinovaném protiproudem a souproudem zapojení na straně parovzduchové směsi a celkovém počtu překřížení 8. Komora KII je řešená jako netopená a bude z vnější strany opatřena izolací. Trubky teplosměnné sekce II jsou zaústěny do komory KIII, která zajišťuje homogenizaci teploty, zavádí směs do sekce III prostřednictvím 60 nátrubků a

umožňuje technologické spojení druhé a závěrečné třetí sekce. Komora KIII je řešená jako netopená a bude opatřena z vnější strany izolací

Teplosměnná plocha závěrečné třetí sekce je tvořena jako dvouvětvou s jednou řadou trubek, v protiproudem zapojení a celkovém počtu překřížení 2. Trubky závěrečné sekce jsou zaústěny do výstupní komory KIV. Prostřednictvím této komory je zavedená směs do propojovacího potrubí mezi výměníkem a kolektorem turbíny. Komora KIV je řešena jako netopená a bude opatřena z vnější strany izolací.

Komora KI bude řešena z nízkolegované oceli, zbývající komory budou řešeny z astenické oceli. Trubky první sekce budou řešeny ze středně a vysoclegovaných ocelí. Trubky druhé sekce budou řešeny z astenické oceli. Trubky závěrečné, nejvíce exponované části, budou řešeny z niklové slitiny využívané při stavbě kotlů s nadkritickými parametry páry. Teplosměnné plochy budou umístěny v oplechovaném kanále opatřený na vnitřní straně izolací v tloušťce zajišťující maximální teplotu ocelového pláště 50°C při venkovní teplotě 25°C. Na obrázku 13 je 3D model ohříváku parovzduchové směsi.



Obr. 13 3D model OPVS

5.1 Tepelná bilance OPVS

Zadané hodnoty na straně spalín:

- Složení vlhkých spalín zemního plynu v % hmotnostních:

$$\text{CO}_2 = 4,7 \text{ [\%]}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 9,89 \text{ [\%]}$$

$$\text{N}_2 = 73,96 \text{ [\%]}$$

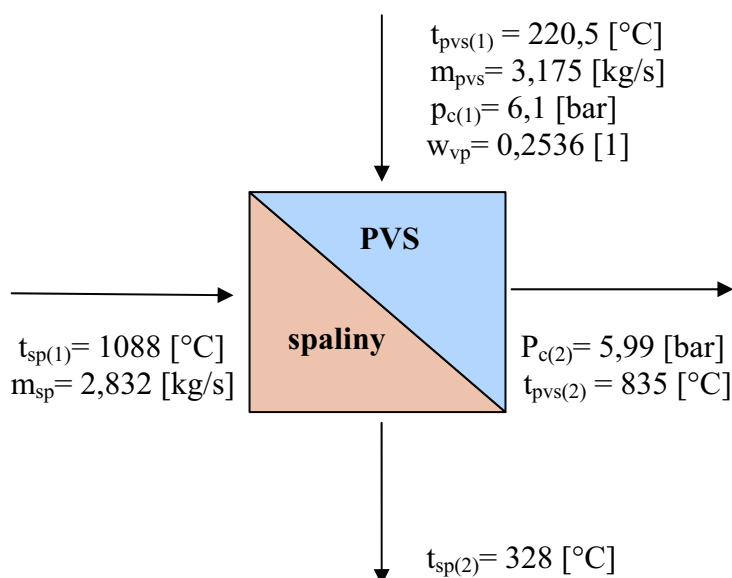
$$\text{O}_2 = 10,57 \text{ [\%]}$$

$$\text{Ar} = 0,88 \text{ [\%]}$$

- Množství spalín: $m_{\text{sp}} = 2,832 \text{ [kg/s]}$
- Teplota spalín na vstupu do výměníku: $t_{\text{sp}(1)} = 1088 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- Teplota spalín na výstupu z výměníku: $t_{\text{sp}(2)} = 328 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Zadané hodnoty na straně PVS:

- Hmotnostní průtok PVS v trubkovém prostoru: $m_{\text{pvs}} = 3,175 \text{ [kg/s]}$
- Teplota PVS na vstupu do výměníku: $t_{\text{pvs}(1)} = 220,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- Teplota PVS na výstupu z výměníku: $t_{\text{pvs}(2)} = 835 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- Celkový tlak PVS na vstupu do výměníku: $p_{\text{c}(1)} = 6,1 \text{ [bar]}$
- Celkový tlak PVS na výstupu z výměníku: $p_{\text{c}(2)} = 5,99 \text{ [bar]}$
- Koncentrace vodní páry v parovzduchové směsi: $w_{\text{vp}} = 0,2536 \text{ [1]}$



5.1.1 Tepelný výkon OPVS na straně PVS

Stanovení měrné plynové konstanty suchého vzduchu a vodní páry r_{vp} a r_{sv} :

$$r_{vp} = \frac{R}{M_{vp}} [J.kg^{-1}.K^{-1}] \quad (4.1)$$

$$r_{sv} = \frac{R}{M_{sv}} [J.kg^{-1}.K^{-1}] \quad (4.2)$$

$$r_{vp} = \frac{8314}{18,02} = [J.kg^{-1}.K^{-1}]$$

$$r_{sv} = \frac{8314}{28,96} = [J.kg^{-1}.K^{-1}]$$

$$\underline{\underline{r_{vp} = 461,5 [J.kg^{-1}.K^{-1}]}}$$

$$\underline{\underline{r_{sv} = 287,1 [J.kg^{-1}.K^{-1}]}}$$

Kde: R...molová plynová konstanta [$J.kmol^{-1}.K^{-1}$], ($R=8314 J.kmol^{-1}.K^{-1}$)

M...molární hmotnost [$kg.kmol^{-1}$],

(V databázi programu EES, $M_{vp}= 18,02 kg.kmol^{-1}$ a $M_{sv}= 28,96 kg.kmol^{-1}$)

Koncentrace suchého vzduchu w_{sv} v parovdychové směsi:

$$w_{sv} = 1 - w_p [kg.kg^{-1}] \quad (4.3)$$

$$w_{sv} = 1 - 0,2536 = [kg.kg^{-1}]$$

$$\underline{\underline{w_{sv} = 0,7464 [kg.kg^{-1}]}}$$

Stanovení parciálních tlaků suchého vzduchu a vodní páry p_{vs} na vstupu do výměníku:

Parciální tlak vodní páry $p_{vp(1)}$ v p_{vs} :

$$p_{vp(1)} = p_{c(1)} \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] [bar] \quad (4.4)$$

$$p_{vp(1)} = 6,1 \cdot \left[1 - \frac{0,7464 \cdot 287,1}{0,7464 \cdot 287,1 + 0,2536 \cdot 461,5} \right] [bar]$$

$$\underline{\underline{p_{vp(1)} = 2,15 [bar]}}$$

Dále je parciální tlak suchého vzduchu $p_{sv(1)}$:

$$\begin{aligned} p_{sv(1)} &= p_{c(1)} - p_{vp(1)} \text{ [bar]} \\ p_{sv(1)} &= 6,1 - 2,15 \text{ [bar]} \\ \underline{\underline{p_{sv(1)} &= 3,95 \text{ [bar]}}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Stanovení parciálních tlaků suchého vzduchu a vodní páry PVS na výstupu z výměníku:

Parciální tlak vodní páry $p_{vp(2)}$ v pvs:

$$\begin{aligned} p_{vp(2)} &= p_{c(2)} \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \text{ [bar]} \\ p_{vp(2)} &= 5,99 \cdot \left[1 - \frac{0,7464 \cdot 287,1}{0,7464 \cdot 287,1 + 0,2536 \cdot 461,5} \right] \text{ [bar]} \\ \underline{\underline{p_{vp(2)} &= 2,12 \text{ [bar]}}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Dále je parciální tlak suchého vzduchu $p_{sv(2)}$:

$$\begin{aligned} p_{sv(2)} &= p_{c(2)} - p_{vp(2)} \text{ [bar]} \\ p_{sv(2)} &= 5,99 - 2,12 \text{ [bar]} \\ \underline{\underline{p_{sv(2)} &= 3,87 \text{ [bar]}}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Stanovení entalpie parovzduchové směsi na vstupu do výměníku:

Entalpie vodní páry $i_{vp(1)}$:

Entalpie vodní páry $i_{vp(1)}$ při teplotě směsi 220,5°C a parciálním tlaku 2,15 bar je 2911 kJ.kg⁻¹.

(hodnota entalpie je převzata z databáze programu EES)

Entalpie suchého vzduchu $i_{sv(1)}$:

$$\begin{aligned} i_{sv(1)} &= c_{str(1)} \cdot t_{pvs(1)} \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \\ i_{sv(1)} &= 1,015 \cdot 220,5 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \\ \underline{\underline{i_{sv(1)} &= 223,9 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Kde: $c_{str(1)}$...střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu [kJ.kg⁻¹]

Entalpie parovzduchové směsi $i_{sm(1)}$ pak je:

$$\begin{aligned}
 i_{sm(1)} &= w_{sv} \cdot i_{sv(1)} + w_{vp} \cdot i_{vp(1)} \quad [kJ.kg^{-1}] \\
 i_{sm(1)} &= 0,7464 \cdot 223,9 + 0,2536 \cdot 2911 \quad [kJ.kg^{-1}] \\
 \underline{\underline{i_{sm(1)} &= 907,1 \quad [kJ.kg^{-1}]}}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Stanovení entalpie parovzduchové směsi na vstupu do výměníku:

Entalpie vodní páry $i_{vp(2)}$:

Entalpie vodní páry $i_{vp(2)}$ při teplotě směsi 835°C, parciálním tlaku 2,12 bar je 4242 kJ.kg⁻¹.
(hodnota entalpie je převzata z databáze programu EES)

Entalpie suchého vzduchu $i_{sv(2)}$:

$$\begin{aligned}
 i_{sv(2)} &= c_{str(2)} \cdot t_{pvs(2)} \quad [kJ.kg^{-1}] \\
 i_{sv(2)} &= 1,074 \cdot 835 \quad [kJ.kg^{-1}] \\
 \underline{\underline{i_{sv(2)} &= 1171 \quad [kJ.kg^{-1}]}}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Kde: $c_{str(2)}$...střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu [kJ.kg⁻¹]

Entalpie parovzduchové směsi $i_{sm(2)}$ pak je:

$$\begin{aligned}
 i_{sm(2)} &= w_{sv} \cdot i_{sv(2)} + w_{vp} \cdot i_{vp(2)} \quad [kJ.kg^{-1}] \\
 i_{sm(2)} &= 0,7464 \cdot 1171 + 0,2536 \cdot 4242 \quad [kJ.kg^{-1}] \\
 \underline{\underline{i_{sm(2)} &= 1746 \quad [kJ.kg^{-1}]}}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Tepelný výkon ohříváku parovzduchové směsi:

$$\begin{aligned}
 Q_{PVS} &= m_{pvs} \cdot (i_{sm(2)} - i_{sm(1)}) \quad [kW] \\
 Q_{PVS} &= 3,175 \cdot (1746 - 907,1) \quad [kW] \\
 \underline{\underline{Q_{PVS} &= 2663,2 \quad [kW]}}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

5.1.2 Tepelný výkon OPVS na straně spalin:

Výpočet entalpie spalin $I_{sp(1)}$ na vstupu do výměníku:

$$I_{sp(1)} = O_{CO_2} \cdot \frac{i_{(1)CO_2}}{\rho_{CO_2}} + O_{H_2O} \cdot \frac{i_{(1)H_2O}}{\rho_{H_2O}} + O_{N_2} \cdot \frac{i_{(1)N_2}}{\rho_{N_2}} + O_{O_2} \cdot \frac{i_{(1)O_2}}{\rho_{O_2}} + O_{Ar} \cdot \frac{i_{(1)Ar}}{\rho_{Ar}} [kJ.m_N^{-3}] \quad (4.13)$$
$$I_{sp(1)} = 0,047 \cdot \frac{2427,91}{1,9768} + 0,0989 \cdot \frac{1901,16}{0,8058} + 0,7396 \cdot \frac{1526,06}{1,25047} + 0,1057 \cdot \frac{1619}{1,42891} +$$
$$+ 0,0088 \cdot \frac{1009,17}{1,78385} [kJ.m_N^{-3}]$$
$$\underline{\underline{I_{sp(1)} = 1318,5 [kJ.m_N^{-3}]}}$$

Kde: O ...koncentrace jednotlivých složek spalin [$m^3.m^{-3}$]

i ...měrná entalpie jednotlivých složek spalin v závislosti na teplotě [$kJ.m_n^{-3}$]

ρ ...měrná hustota jednotlivých složek spalin [$kg.m_n^{-3}$]

(Hodnoty entalpie a hustot jsou převzaty z literatury)

Výpočet entalpie spalin $I_{sp(2)}$ na výstupu z výměníku:

$$I_{sp(2)} = O_{CO_2} \cdot \frac{i_{(2)CO_2}}{\rho_{(1)CO_2}} + O_{H_2O} \cdot \frac{i_{(2)H_2O}}{\rho_{(1)H_2O}} + O_{N_2} \cdot \frac{i_{(2)N_2}}{\rho_{(1)N_2}} + O_{O_2} \cdot \frac{i_{(2)O_2}}{\rho_{(1)O_2}} + O_{Ar} \cdot \frac{i_{(2)Ar}}{\rho_{(1)Ar}} [kJ.m_N^{-3}]$$
$$I_{sp(2)} = 0,047 \cdot \frac{618,468}{1,9768} + 0,0989 \cdot \frac{508,468}{0,8058} + 0,7396 \cdot \frac{429,788}{1,25047} + 0,1057 \cdot \frac{447,148}{1,42891} +$$
$$+ 0,0088 \cdot \frac{304,812}{1,78385} [kJ.m_N^{-3}] \quad (4.14)$$
$$\underline{\underline{I_{sp(2)} = 376,5 [kJ.m_N^{-3}]}}$$

Tepelný výkon ohříváku Q_{SP} parovzduchové směsi:

$$Q_{SP} = m_{sp} \cdot (i_{sp(1)} - i_{sp(2)}) [kW] \quad (4.15)$$
$$Q_{SP} = 2,832 \cdot (1318,5 - 376,5) [kW]$$
$$\underline{\underline{Q_{SP} = 2666,7 [kW]}}$$

Tepelná bilance ohříváku parovzduchové směsi: (neuvažují se ztráty do okolí)

$$Q_{PVS} = Q_{SP} [kW]$$
$$\underline{\underline{2663,2 = 2666,7 [kW]}} \quad (4.16)$$

5.1.3 Výkony jednotlivých sekcí OPVS

Celý výměník je rozdělen do tří sekcí, to znamená že první sekce je od komory KI do komory KII. Druhá sekce je od komory KII do komory KIII a třetí sekce je z komory KIII do komory KIV. Komory jsou izolované, takže se nepředpokládá žádný přestup tepla ze spalín do parovzduchové směsi.

Výkon jednotlivých sekcí je počítán ze známosti teploty, tlaku a množství parovzduchové směsi. Výpočet entalpie pvs je stejný jako v kapitole 4.1.1.

Výkon první sekce:

$$Q_1 = m_{pvs} \cdot (i_2 - i_1) [kW] \quad (4.17)$$

$$Q_1 = 3,175 \cdot (1291 - 905,4) [kW]$$

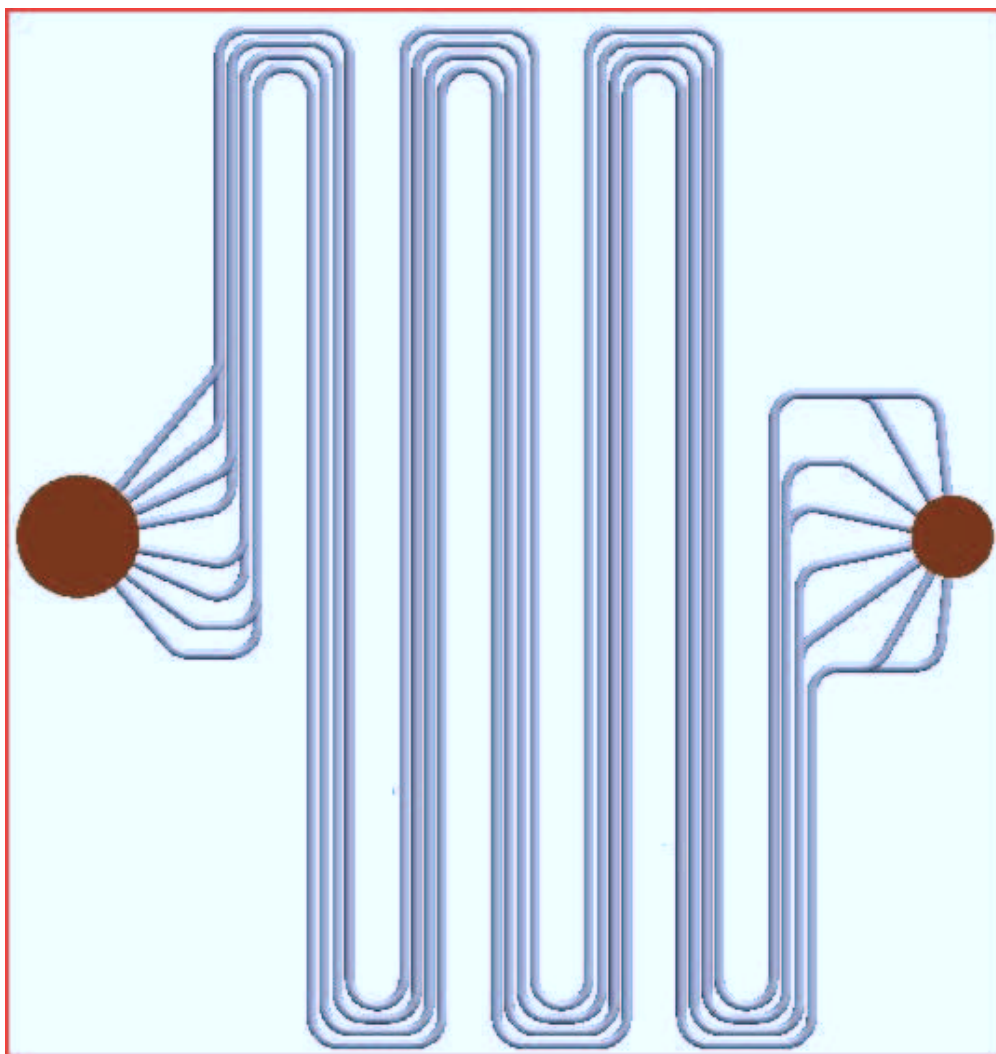
$$\underline{\underline{Q_1 = 1223,5 [kW]}}$$

Kde: m_{pvs} ...množství parovzduchové směsi [$kg \cdot s^{-1}$]

i_2 ...entalpie pvs na vstupu do komory KII [$kJ \cdot kg^{-1}$]

i_1 ...entalpie pvs na výstupu z komory KI [$kJ \cdot kg^{-1}$]

Na obrázku 14 je první sekce opvs, kde je možnost vidět že se jedná o jednovětvové teplosměnné plochy tvořené čtyřmi řadami trubek a celkovém počtu překřížení 6. První sekce je řešena v protiproudém zapojení.



Obr. 14 První sekce OPVS

Výkon druhé sekce:

$$Q_2 = m_{pvs} \cdot (i_3 - i_2) [kW] \quad (4.18)$$

$$Q_2 = 3,175 \cdot (1675 - 1291) [kW]$$

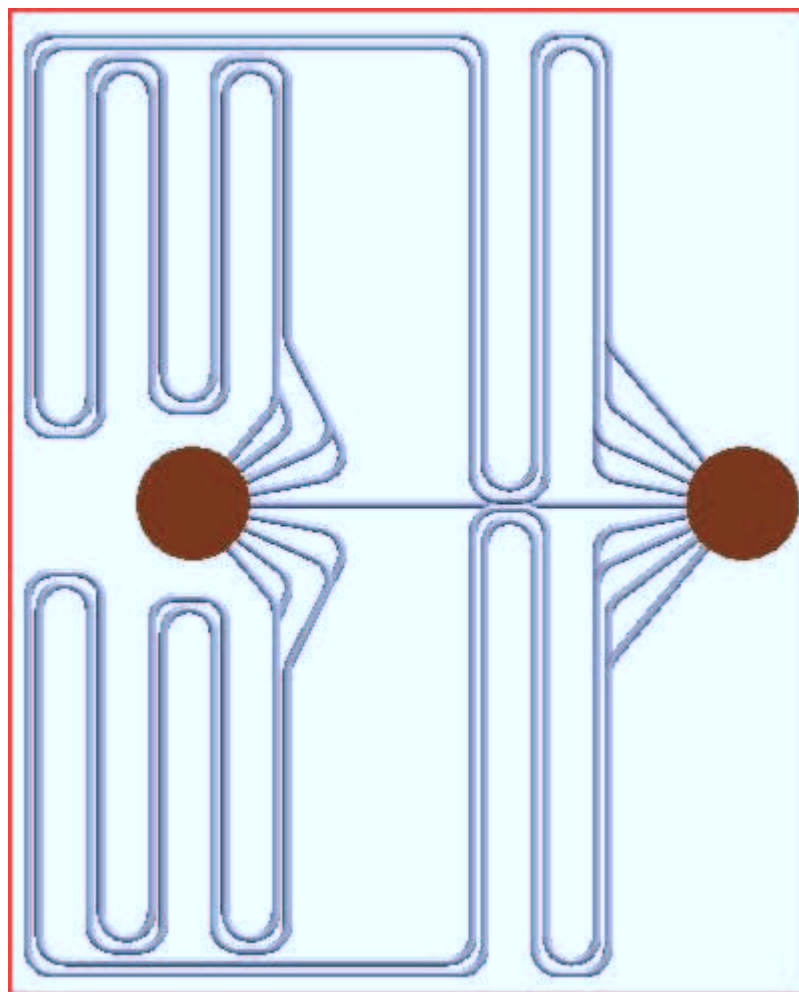
$$Q_2 = 1218,2 [kW]$$

Kde: m_{pvs} ...množství parovzduchové směsi [$kg \cdot s^{-1}$]

i_2 ...entalpie pvs na výstupu z komory KII [$kJ \cdot kg^{-1}$]

i_3 ...entalpie pvs na vstupu do komory KIII [$kJ \cdot kg^{-1}$]

Druhá sekce výměníku je tvořena dvouvětвовou teplosměnnou plochou, dvěma řadami trubek v kombinovaném protiproudém a souproudém zapojení na straně parovzduchové směsi a celkovém počtu překřížení 8. Schéma je uvedeno na obrázku 15.



Obr. 15 Druhá sekce OPVS

Výkon třetí sekce:

$$Q_3 = m_{pvs} \cdot (i_4 - i_3) [kW] \quad (4.19)$$

$$Q_3 = 3,175 \cdot (1745 - 1675) [kW]$$

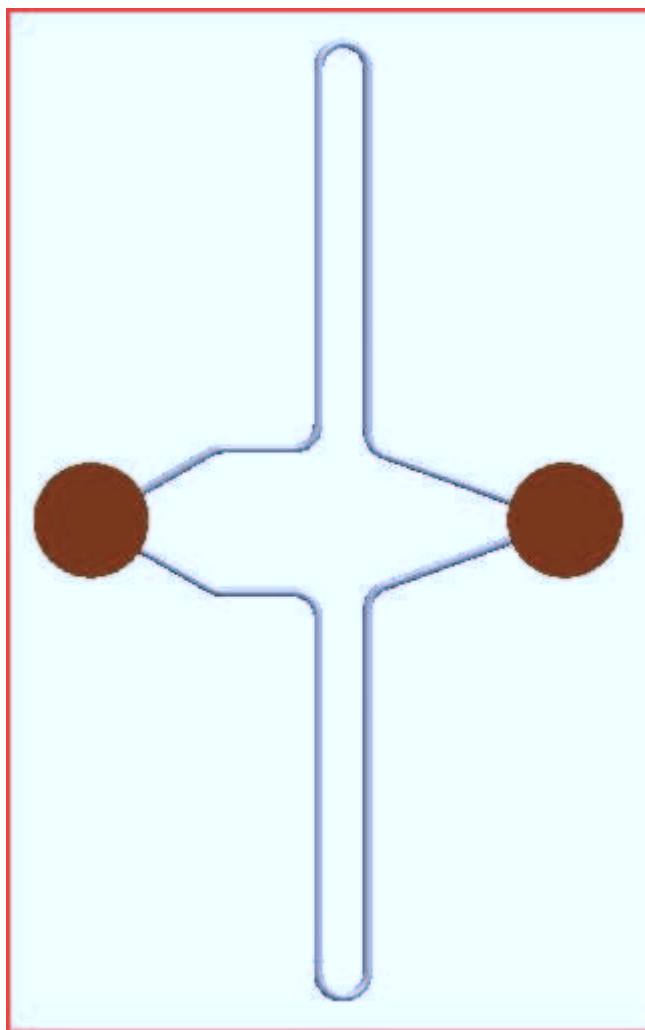
$$Q_3 = 221,3 [kW]$$

Kde: m_{pvs} ...množství parovzduchové směsi [$kg \cdot s^{-1}$]

i_3 ...entalpie pvs na výstupu z komory KIII [$kJ \cdot kg^{-1}$]

i_4 ...entalpie pvs na vstupu do komory KIV [$kJ \cdot kg^{-1}$]

Na obrázku 16 je třetí sekce OPVS, kde možnost vidět, že teplosměnná plocha závěrečné třetí sekce je tvořena jako dvouvětvou s jednou řadou trubek, v protiproudém zapojení a celkovém počtu překřížení 2.

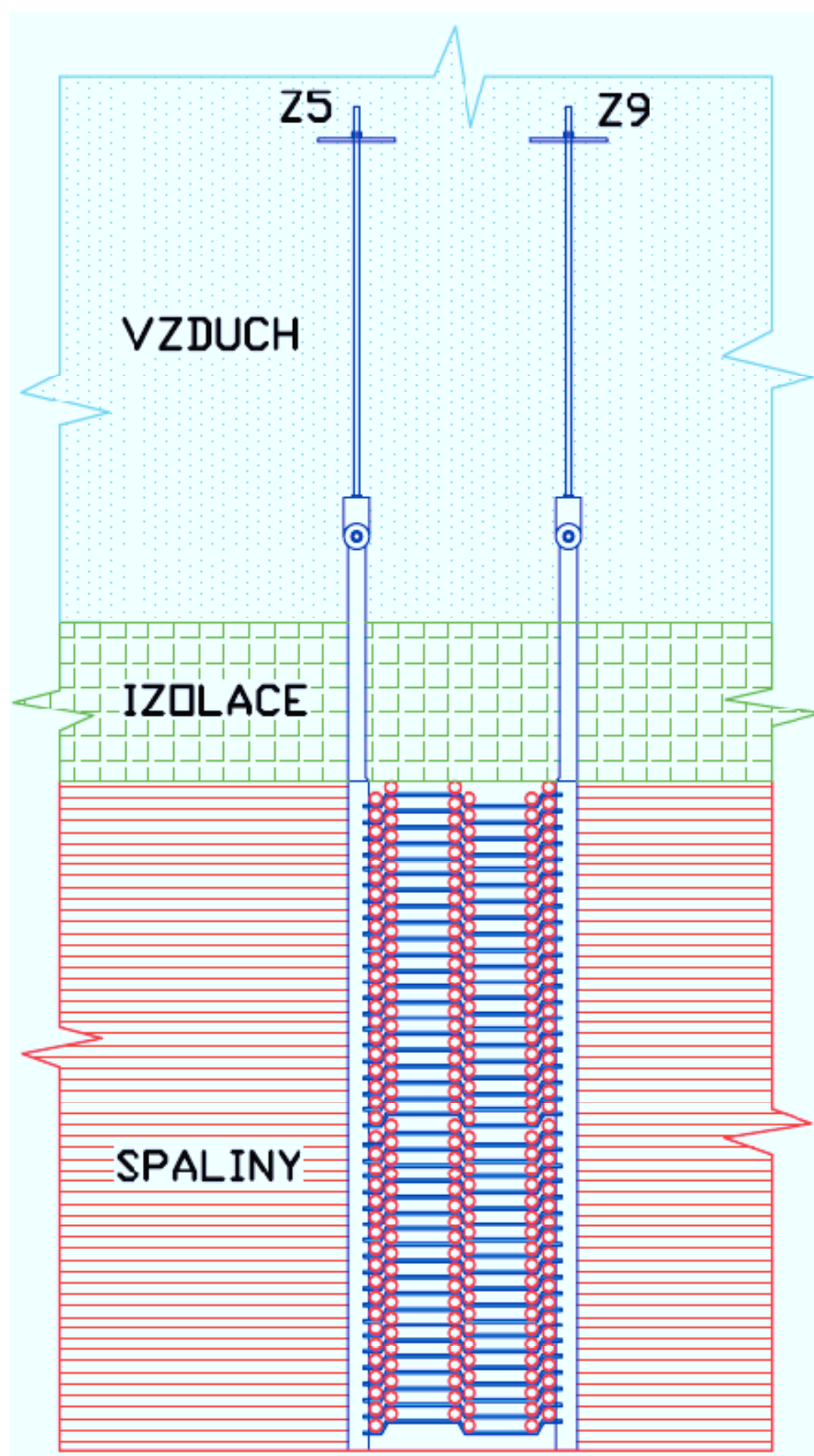


Obr. 16 Třetí sekce OPVS

5.2 Tepelná roztažnost závěsů trubek OPVS ve svislém směru

Trubky tlakového celku sekce I, II a III jsou uloženy na speciálních tvarových podložkách, které jsou zasunuty do nechlazených L- profilů. Tyto závěsy budou uchyceny k vlastní ocelové konstrukci OPVS. Jediná sekce VI je zavěšená na chlazených závěsech, které jsou chlazeny samotnou parovzduchovou směsí. Na obrázku 18 je schematicky naznačeno umístění všech 12. Závěsů.

Na obrázku 17 je naznačen závěs druhé sekce OPVS. Jak je vidět, tak je umístěn z části ve spalínách, izolaci a mimo výměník na vzduchu. Jelikož tepelná roztažnost materiálu je funkcí teploty, délky a součinitele tepelné vodivosti musím určit teploty závěsu. Část závěsu umístěnou ve spalínách uvažuji s teplotou spalin. V části závěsu umístěné v izolaci a mimo výměník na vzduchu bude docházet k šíření tepelné energie vedením. Pro stanovení teploty na konci závěsu bude nutné vypočítat součinitelé přestupu tepla.



Obr. 17 Závěs druhé sekce OPVS

5.2.1 Tepelná roztažnost části závěsu Z5 umístěná ve spalínách

V místě zavěšení Z5 je teplota spalin 992°C = teplota závěsu ve spalínách Z5. Délka závěsu je 3698 mm, z toho 2282 mm se nachází ve spalínách, 400 mm v izolaci a 1378 mm mimo výměník na vzduchu (viz obrázek 17).

$$\Delta l_{sp} = l \cdot \Delta t \cdot \beta \quad [\text{mm}] \quad (4.20)$$

$$\Delta l_{sp} = 2282 \cdot 972 \cdot 1,75 \cdot 10^{-5} \quad [\text{mm}]$$

$$\underline{\underline{\Delta l_{sp} = 38,8 \quad [\text{mm}]}}$$

Kde: l ...délka závěsu [mm]

Δt ...rozdíl teploty v teplém a studeném stavu (ve studeném stavu počítám s teplotou 20°C)

β ...součinitel tepelné roztažnosti při teplotě Δt [K^{-1}]

5.2.2 Tepelná roztažnost části závěsu Z5 umístěná v izolaci

Výpočet součinitele přestupu tepla na straně spalin:

Fyzikální vlastnosti spalin pro 992°C

- $Pr = 0,58$ [1]
- $\nu = 172,5 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
- $\lambda = 10,8 \cdot 10^{-2} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

Reynoldsovo kritérium:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad [1] \quad (4.21)$$

$$Re = \frac{1,62 \cdot 0,016}{172,5 \cdot 10^{-6}} \quad [1]$$

$$\underline{\underline{Re = 150,26 \quad [1]}}$$

Kde: w ...rychlost spalin ve OPVS [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

d ...šířka závěsů [m]

ν ...kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Nusseltovo kritérium:

$$\begin{aligned}Nu &= c \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,25} [1] \\Nu &= 0,665 \cdot 150,26^{0,47} \cdot 0,58^{0,25} [1] \\Nu &= 6,12 [1]\end{aligned}\tag{4.22}$$

Kde: c, n...součinitel při proudění kolmo k trubce při dané hodnotě Re [1]

Součinitel přestupu tepla:

$$\begin{aligned}\alpha_{sp} &= \frac{Nu \cdot \lambda}{d} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \\ \alpha_{sp} &= \frac{11,39 \cdot 10,8 \cdot 10^{-2}}{0,016} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \\ \alpha_{sp} &= 41,31 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]\end{aligned}\tag{4.23}$$

Kde: λ ...tepelná vodivost spalin [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

d...průměr závěsu [m]

Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vzduchu (mimo izolaci):

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro 20°C

- $\text{Pr} = 0,703 [1]$
- $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$
- $\lambda = 2,591 \cdot 10^{-2} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Reynoldsovo kritérium:

$$\begin{aligned}\text{Re} &= \frac{w \cdot d}{\nu} [1] \\ \text{Re} &= \frac{0,2 \cdot 0,016}{15,06 \cdot 10^{-6}} [1] \\ \text{Re} &= 212,48 [1]\end{aligned}\tag{4.24}$$

Kde: w...odhadovaná rychlost proudění vzduchu [$m \cdot s^{-1}$]

d...průměr závěsu [m]

ν ...kinematická viskozita vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$]

Nusseltovo kritérium:

$$\begin{aligned}
 Nu &= c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,25} [1] \\
 Nu &= 0,665.212,48^{0,47} \cdot 0,703^{0,25} [1] \\
 \underline{\underline{Nu}} &= \underline{\underline{7,55}} [1]
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

Kde: c,n...součinitel při proudění kolmo k trubce při dané hodnotě Re [1]

Součinitele přestupu tepla:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{vz} &= \frac{Nu \cdot \lambda}{d} [W.m^{-2}.K^{-1}] \\
 \alpha_{vz} &= \frac{7,55 \cdot 2,591 \cdot 10^{-2}}{0,016} [W.m^{-2}.K^{-1}] \\
 \underline{\underline{\alpha_{vz}}} &= \underline{\underline{12,23}} [W.m^{-2}.K^{-1}]
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

Kde: λ ...tepelná vodivost vzduchu [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

Teplo sdělené závěsem:

$$\begin{aligned}
 q_{iz} &= \frac{t_{sp} - t_{vz}}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{vz}}} [W.m^{-2}] \\
 q_{iz} &= \frac{992 - 20}{\frac{1}{41,31} + \frac{0,4}{19,5} + \frac{1}{12,23}} [W.m^{-2}] \\
 \underline{\underline{q_{iz}}} &= \underline{\underline{7684,63}} [W.m^{-2}]
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

Kde: λ ...součinitel tepelné vodivosti materiálu [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

t_{sp} ...teplota spalin [$^{\circ}C$]

t_{vz} ...teplota vzduchu [$^{\circ}C$]

Teplota závěsu na vstupu do izolace:

$$\begin{aligned}
 t_{iz(1)} &= t_{sp} - q \cdot \frac{1}{\alpha_{sp}} [^{\circ}C] \\
 t_{iz(1)} &= 992 - 7684,63 \cdot \frac{1}{41,31} [^{\circ}C] \\
 \underline{\underline{t_{iz(1)}}} &= \underline{\underline{806}} [^{\circ}C]
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

Teplota závěsu na výstupu z izolace:

$$t_{iz(2)} = t_{sp} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{l}{\lambda} \right) [^{\circ}C] \quad (4.29)$$

$$t_{iz(2)} = 992 - 7684,63 \cdot \left(\frac{1}{41,31} + \frac{0,4}{19,5} \right) [^{\circ}C]$$

$$\underline{\underline{t_{iz(2)} = 648 [^{\circ}C]}}$$

Střední teplota závěsu pak je:

$$t_{str(iz)} = \frac{806 + 648}{2} = 727 [^{\circ}C]$$

Tepelná roztažnost závěsu Z5 v izolaci:

(pro výpočet počítám se střední teplotou)

$$\Delta l_{iz} = l \cdot \Delta t \cdot \beta [mm]$$

$$\Delta l_{iz} = 400.707.1,51.10^{-5} [mm] \quad (4.30)$$

$$\underline{\underline{\Delta l_{iz} = 4,3 [mm]}}$$

5.2.3 Tepelná roztažnost části závěsu Z5 umístěná mimo výměník

Teplo sdělené závěsem:

$$q_{vz} = \frac{t_{sp} - t_{vz}}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{vz}}} [W.m^{-2}] \quad (4.31)$$

$$q_{vz} = \frac{992 - 20}{\frac{1}{41,31} + \frac{1,778}{19,5} + \frac{1}{12,23}} [W.m^{-2}]$$

$$\underline{\underline{q_{vz} = 8364,57 [W.m^{-2}]}}$$

Teplota závěsu na vstupu z výměníku = teplota závěsu na výstupu z izolace (648°C)

Teplota na konci závěsu:

$$t_{vz(2)} = t_{sp} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{l}{\lambda} \right) [^{\circ}C] \quad (4.32)$$

$$t_{vz(2)} = 992 - 8364,57 \cdot \left(\frac{1}{41,31} + \frac{1,778}{19,5} \right) [^{\circ}C]$$

$$\underline{\underline{t_{vz(2)} = 27 [^{\circ}C]}}$$

Střední teplota závěsu pak je:

$$t_{str(vz)} = \frac{648 + 27}{2} = 337,5 [^{\circ}C] \quad (4.33)$$

Tepelná roztažnost závěsu Z5 mimo výměník:

(pro výpočet počítám se střední teplotou)

$$\Delta l_{vz} = l \cdot \Delta t \cdot \beta [mm] \quad (4.34)$$

$$\Delta l_{vz} = 1378,317,5 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} [mm]$$

$$\underline{\underline{\Delta l_{vz} = 5,9 [mm]}}$$

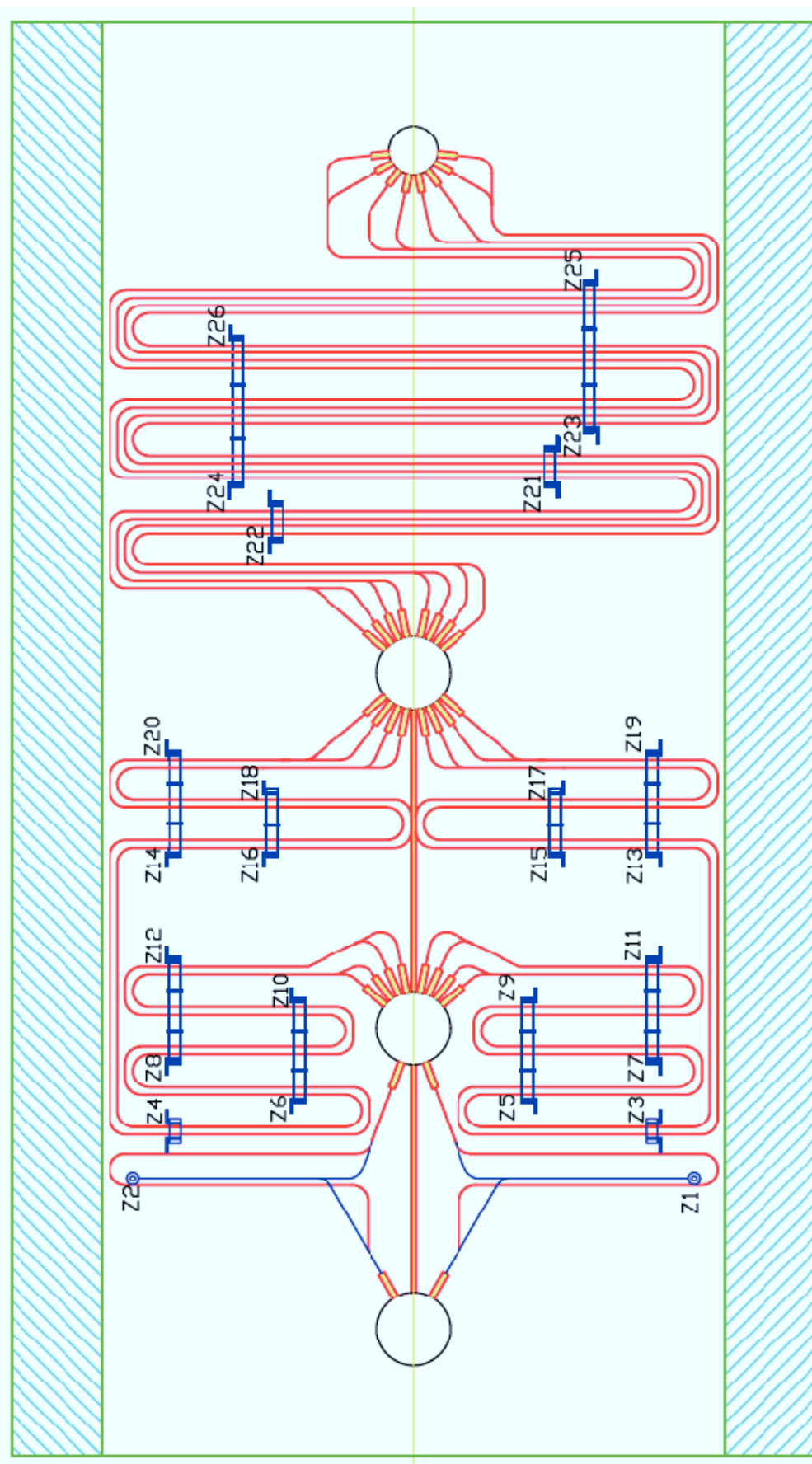
Celkové prodloužení závěsu:

$$\Delta l_c = \Delta l_{sp} + \Delta l_{iz} + \Delta l_{vz} [mm]$$

$$\Delta l_c = 38,8 + 4,3 + 5,9 [mm] \quad (4.35)$$

$$\underline{\underline{\Delta l_c = 49 [mm]}}$$

Na obrázku 18 je znázorněno umístění a označení závěsu a v tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty prodloužení všech 26 závěsů.



Obr. 18 Schéma závěsů a jejich označení

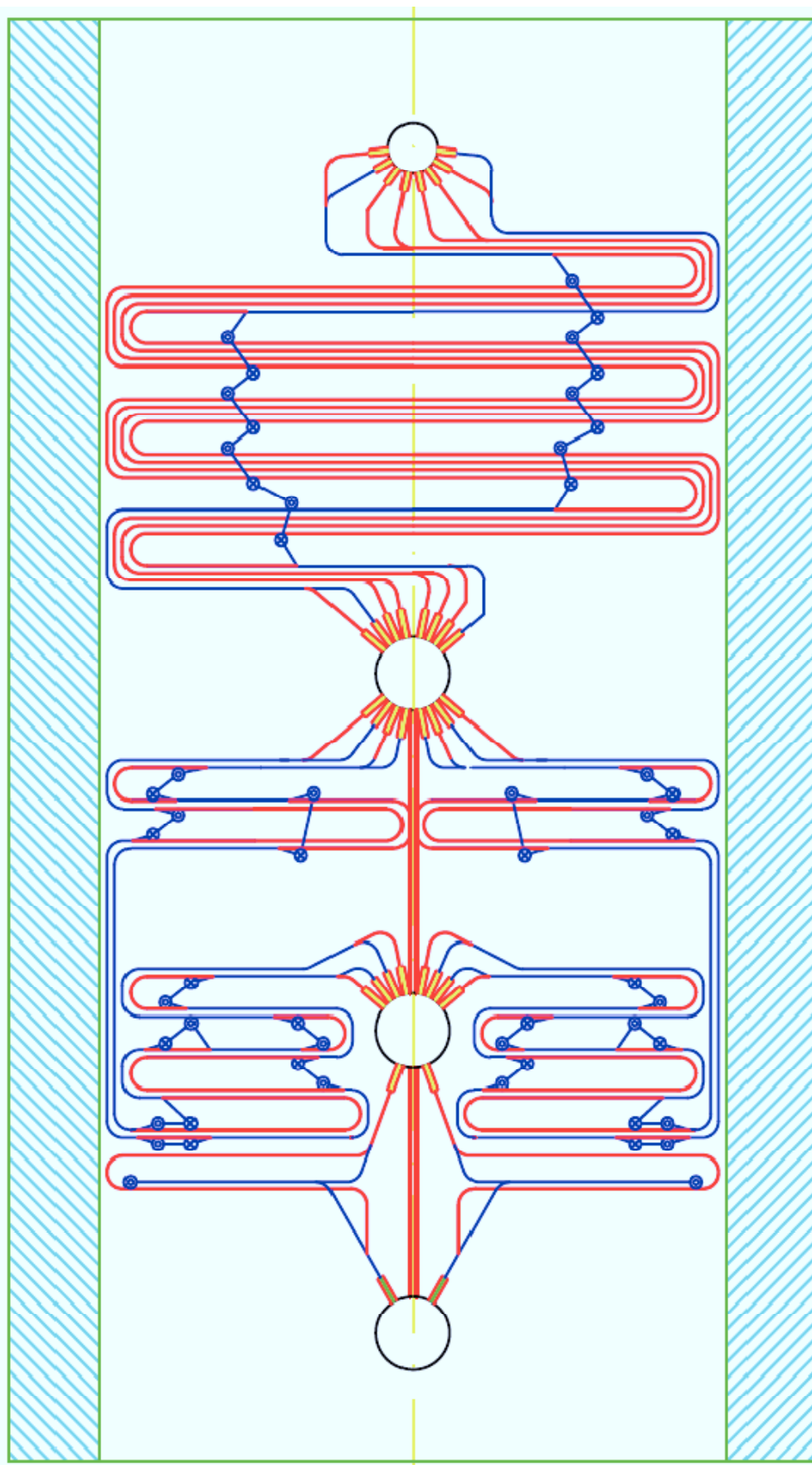
Tab. 2

označení závěsu	teplota závěsu	Δl_{sp}	Δl_{iz}	Δl_{vz}	Δl_c
	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Z1	1088	30	4,7	6,5	41,2
Z2	1088	30	4,7	6,5	41,2
Z3	1055	41,3	4,5	6,3	52,1
Z4	1055	41,3	4,5	6,3	52,1
Z5	992	38,8	4,3	5,9	49,0
Z6	992	38,8	4,3	5,9	49,0
Z7	944	36,9	4,1	5,6	46,6
Z8	944	36,9	4,1	5,6	46,6
Z9	924	36,1	4,0	5,5	45,6
Z10	924	36,1	4,0	5,5	45,6
Z11	882	34,5	3,8	5,2	43,6
Z12	882	34,5	3,8	5,2	43,6
Z13	863	33,8	3,7	5,1	42,6
Z14	863	33,8	3,7	5,1	42,6
Z15	863	33,8	3,7	5,1	42,6
Z16	863	33,8	3,7	5,1	42,6
Z17	783	30,6	3,4	4,6	38,7
Z18	783	30,6	3,4	4,6	38,7
Z19	740	28,9	3,2	4,4	36,6
Z20	740	28,9	3,2	4,4	36,6
Z21	624	24,4	2,7	3,7	30,8
Z22	702	27,5	3,0	4,2	34,7
Z23	552	21,6	2,4	3,3	27,3
Z24	624	24,4	2,7	3,7	30,8
Z25	428	16,7	1,9	2,5	21,1
Z26	487	19,0	2,1	2,9	24,1

5.3 Návrh alternativního zavěšení OPVS

Při návrhu alternativního zavěšení je cílem navrhnout v sekci I, II a III závěsy chlazené pvs, jako je to mu v sekci IV. Požadavkem je, aby umístění závěsů bylo na stejných pozicích, jako jsou nechlazené závěsy.

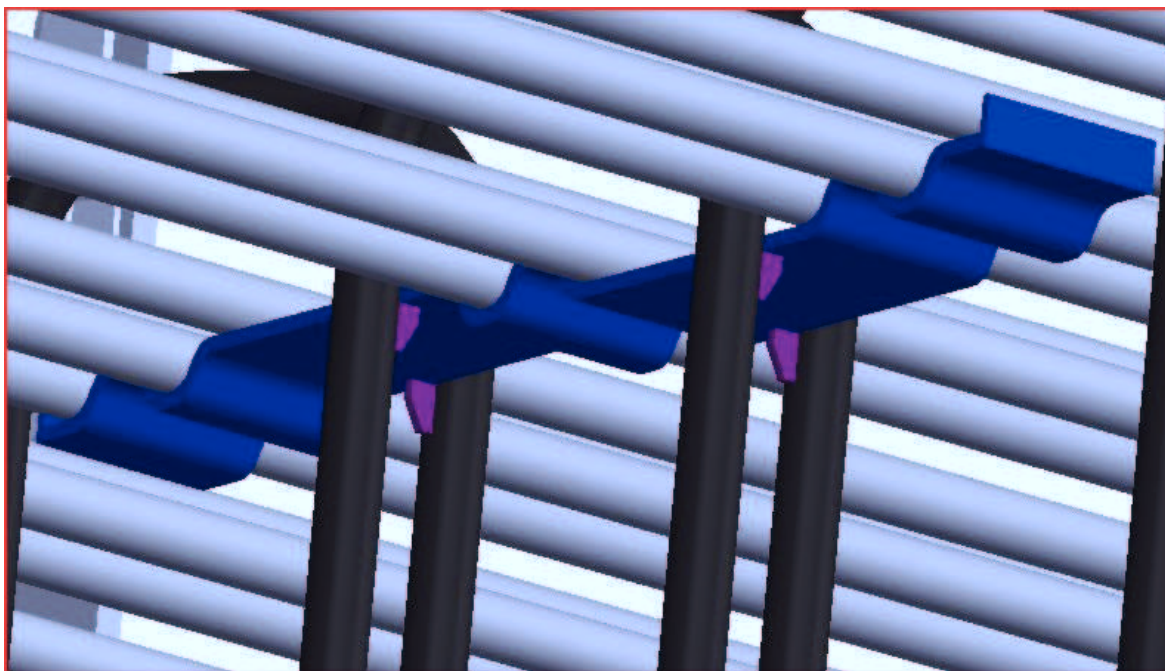
Při řešení tohoto úkolu bylo nezbytné celý OPVS namodelovat ve 3 D programu (Solidworks), proto aby se dala navrhnout optimální trasa vedení trubek závěsů OPVS. Dalším kritériem bylo dodržet délku trubek závěsů tak aby nebyly delší, než jsou trubky v nacházející se sekci (tzn. trubka závěsů v I. Sekci „nesmí“ překročit délku trubky v I. sekci svazku). Celkem jsem zpracoval 3 možné způsoby vedení závěsných trubek, na obrázku 19 je vidět ten nejlépe realizovatelný.



Obr. 19 Schéma vedení závěsných trubek

Modrou barvou jsou značeny závěsné trubky, kde jedna závěsná trubka nahrazuje jednu trubku v daném svazku. Z komory je vždy vyvedena spodní trubka a zaústění do další komory je stejné jako by se jednalo o trubku ze svazku. Směr trubek je na schématu naznačen kolečkem- směr nahoru, křížkem- směr dolů. Přes veškeré úsilí se nepodařilo dodržet délku závěsných trubek v 2. Sekci OPVS, kde závěsná trubka je téměř o 10 metrů delší než trubka ve svazku. Pro velké tlakové ztráty nebude moci být použit tento závěs. Jelikož, není jiná možnost způsobu vedení závěsných trubek, nezabývám se touto problematikou.

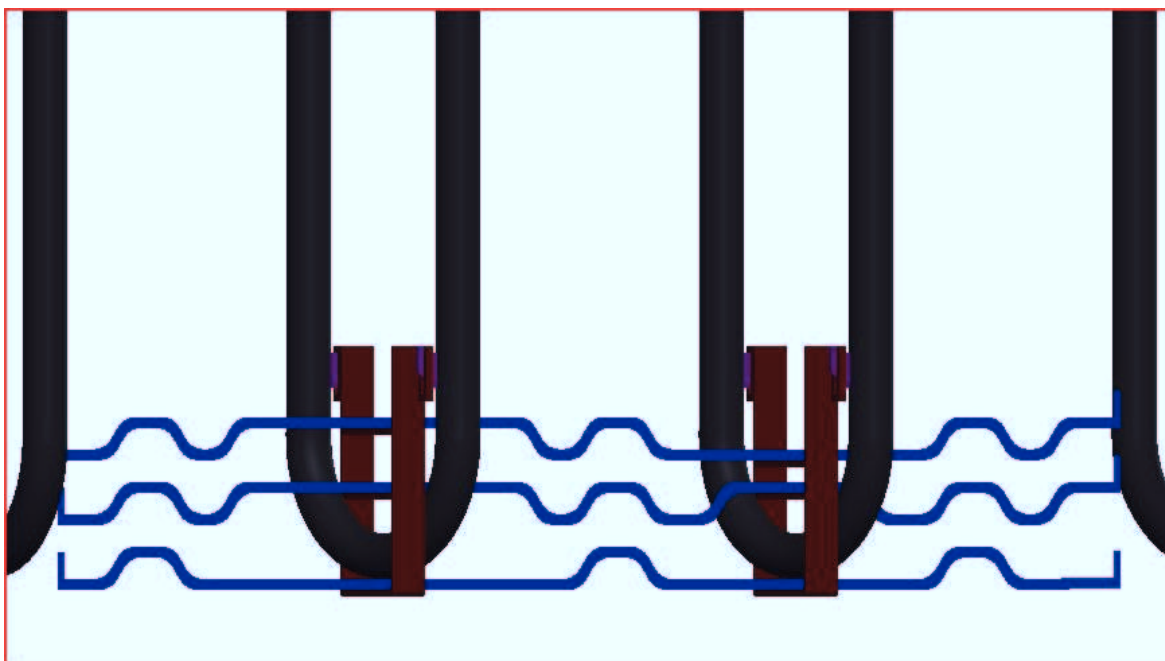
Po zkonstruování závěsných trubek bylo potřeba navrhnout uchycení tvarových vlnovců, které nesou teplosměnné trubky. Na obrázku 20 je detail uchycení tvarových vlnovců na závěsné trubky. (jedná se o alternativu závěsu s označením Z23, Z25).



Obr. 20 Detail uchycení tvarového vlnovce

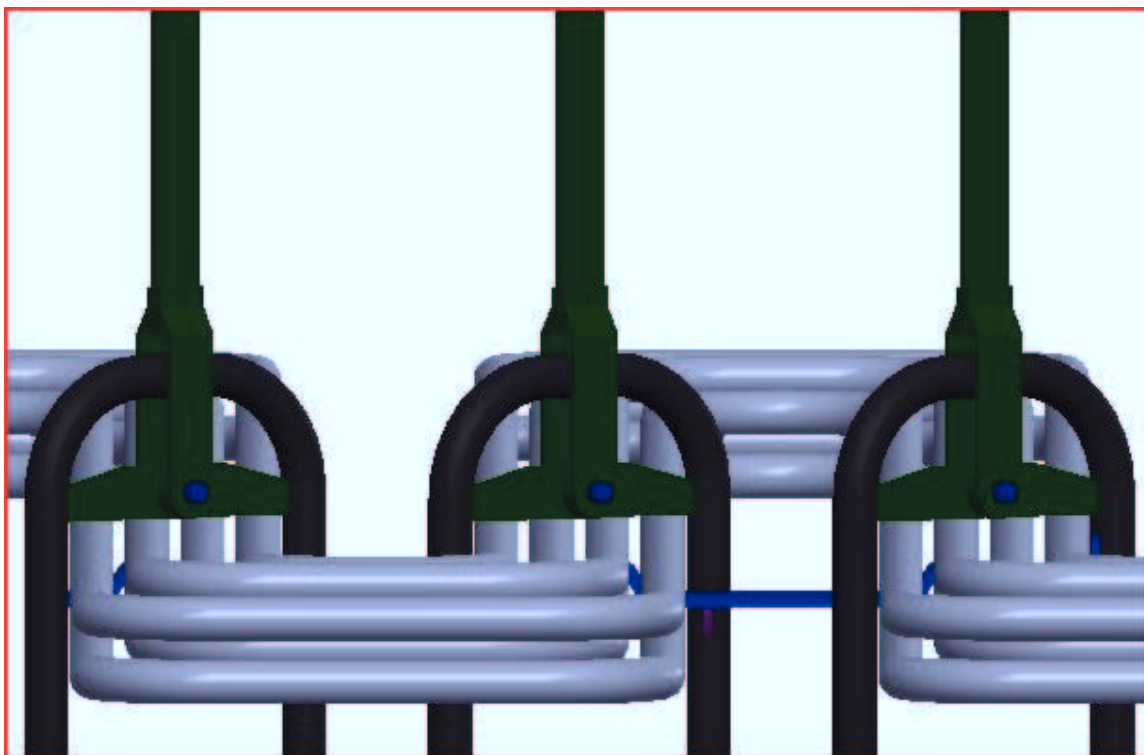
Uchycení je provedeno přivařenými nosy na závěsné trubky. Tvarový vlnovec je pak volně, bez přivaření usazen na nosech.

Jelikož minimální poloměr ohybu trubek nesmí být menší jak 90 mm, není možno stejným způsobem uchytit poslední tři tvarové vlnovce. Uchycení je zkonstruováno pomocí speciálního závěsného žebříku, který je na obrázku 21.



Obr. 21 Detail uchycení posledních 3 vlnovců

Celá závěsná trubka je pak uchycena pomocí na kant přivařeného plocháče, na který je navlečeno táhlo spojeno čepem. Celé spojení je znázorněno na obrázku 22. Na obrázku 23 je pak finální 3D model OPVS s navrhnutým alternativním zavěšením.



Obr. 22 Detail uchycení závěsných trubek

5.4 Tepelná roztažnost alternativního zavěšení

Alternativní závěsy budou mít odlišnou tepelnou roztažnost než původní zavěšení, a to ta část závěsu, která se nachází ve spalínách. Jak již bylo ukázáno na obrázku 17 (kapitola 4.2), závěsy trubek OPVS se nacházejí z části ve spalínách, izolaci a volně na vzduchu. Zjednodušeně lze říci, že část závěsu umístěná ve spalínách, je nahrazena trubkou chlazenou pvs. Teploty těchto závěsných trubek jsou určeny na základě údajů o teplotách teplosměnných trubek (dodané společností Vítkovice). Jelikož počet a umístění závěsů je stejné jako, v původním stavu budou se hodnoty prodloužení lišit pouze v označení Δl_{sp} a samozřejmě Δl_c . Analogie výpočtu je stejná jako v kapitole 4.2, proto uvádím v tabulce 3 pouze vypočtené výsledky.

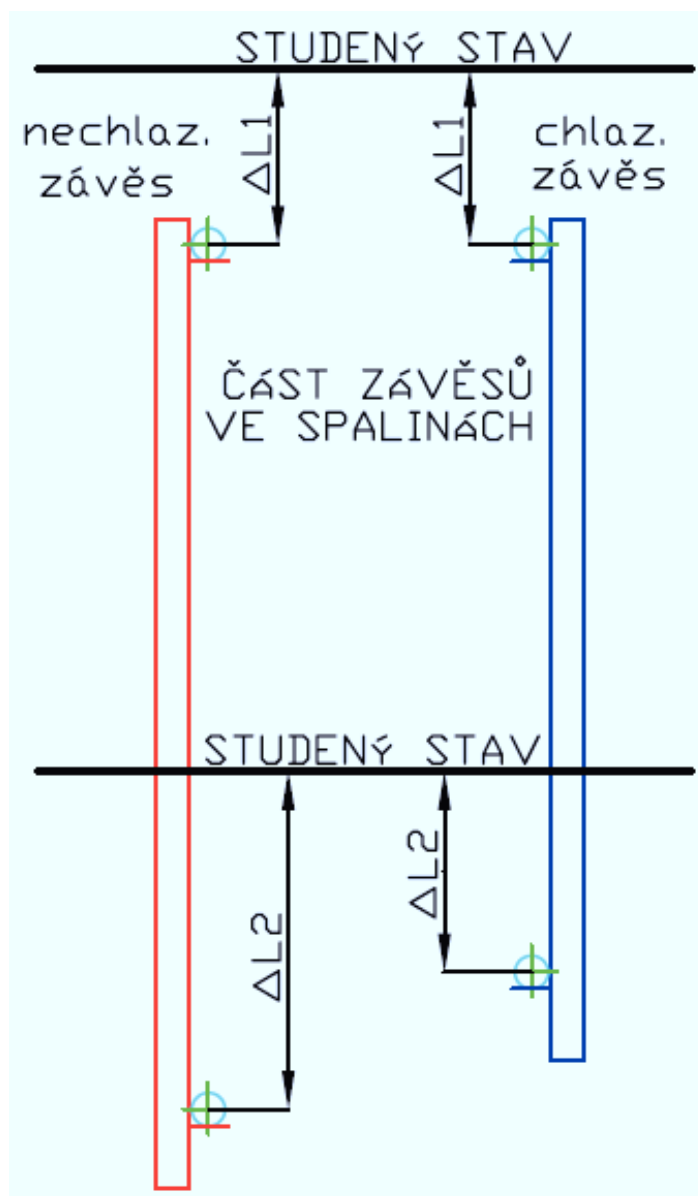
Tab. 3

označení závěsu	teplota v místě závěsu	Δl_{sp}	Δl_{iz}	Δl_{vz}	Δl_c
	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Z1	1088	30	4,7	6,5	41,2
Z2	1088	30	4,7	6,5	41,2
Z3	1055	29	4,5	6,3	39,8
Z4	1055	29	4,5	6,3	39,8
Z5	992	27,5	4,3	5,9	37,7
Z6	992	27,5	4,3	5,9	37,7
Z7	944	26	4,1	5,6	35,7
Z8	944	26	4,1	5,6	35,7
Z9	924	25,5	4,0	5,5	35
Z10	924	25,5	4,0	5,5	35
Z11	882	24,5	3,8	5,2	33,5
Z12	882	24,5	3,8	5,2	33,5
Z13	863	23,5	3,7	5,1	32,3
Z14	863	23,5	3,7	5,1	32,3
Z15	863	23,5	3,7	5,1	32,3
Z16	863	23,5	3,7	5,1	32,3
Z17	783	21,5	3,4	4,6	29,5
Z18	783	21,5	3,4	4,6	29,5
Z19	740	20,5	3,2	4,4	28,1
Z20	740	20,5	3,2	4,4	28,1
Z21	624	17	2,7	3,7	23,4
Z22	702	19,5	3,0	4,2	26,7
Z23	552	15	2,4	3,3	20,7
Z24	624	17	2,7	3,7	23,4
Z25	428	12	1,9	2,5	16,4
Z26	487	13,5	2,1	2,9	18,5

5.5 Porovnání obou způsobů zavěšení

1. Z hlediska posunutí horní a spodní trubky

Na obrázku 24 je znázorněn svislý posun horní a dolní teplosměnné trubky obou způsobu provedení. Posun horní trubky bude u obou způsobů zavěšení stejný, z důvodu že chlazení závěsu je pouze v oblasti spalin. V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty posunutí.



Obr. 24 Posuv horní a spodní trubky

Tab. 4

označení závěsu	nechlazený závěs		chlazený závěs		rozdíl
	$\Delta L1$	$\Delta L2$	$\Delta L1$	$\Delta L2$	$\Delta L2(\text{chl}) - \Delta L2(\text{nechl.})$
Z1	11,2	30	11,2	30	-
Z2	11,2	30	11,2	30	-
Z3	10,8	41,3	10,8	29,3	12
Z4	10,8	41,3	10,8	29,3	12
Z5	10,2	38,8	10,2	27,5	11,3
Z6	10,2	38,8	10,2	27,5	11,3
Z7	9,7	36,9	9,7	26,1	10,8
Z8	9,7	36,9	9,7	26,1	10,8
Z9	9,5	36,1	9,5	25,4	10,7
Z10	9,5	36,1	9,5	25,4	10,7
Z11	9	34,5	9	24,6	9,9
Z12	9	34,5	9	24,6	9,9
Z13	8,8	33,8	8,8	23,3	10,5
Z14	8,8	33,8	8,8	23,3	10,5
Z15	8,8	33,8	8,8	23,3	10,5
Z16	8,8	33,8	8,8	23,3	10,5
Z17	8	30,6	8	21,4	9,2
Z18	8	30,6	8	21,4	9,2
Z19	7,6	28,9	7,6	20,5	8,4
Z20	7,6	28,9	7,6	20,5	8,4
Z21	6,4	24,4	6,4	17,1	7,3
Z22	7,2	27,5	7,2	19,4	8,1
Z23	5,7	21,6	5,7	15,1	6,5
Z24	6,4	24,4	6,4	17,2	7,2
Z25	4,4	16,7	4,4	12,1	4,6
Z26	5	19	5	13,5	5,5

2. Délka závěsné trubky z hlediska hydraulických ztrát

V tomto porovnání porovnávám délku jedné závěsné trubky k trubce teplosměnné, nacházející se v daném svazku. V první sekci OPVS (obrázek 14, kapitola 4.1.3) je střední délka jedné trubky 21,2m. Délka závěsné trubky, která tvoří závěs Z21, Z23, Z25 má délku 23,1 m. Při takové délce trubky je tento rozdíl zanedbatelný. V druhé sekci (obrázek 15, kapitola 4.1.4) je střední délka jedné trubky 13,4 m. Délka závěsné trubky, která tvoří závěs Z14, Z4, Z6, Z12 má délku 23,4 m. Tento rozdíl by se musel řešit, větším průměrem závěsné trubky ve svislé části.

3. Z hlediska velikosti tepelné toku

Firma Vítkovice Power Engineering, má provedený tepelný výpočet pro původní řešení OPVS. Jedná se o náročný výpočet, který je udělán pro každou trubku zvlášť. Při řešení s chlazenými závěsy by se musel zhotovit nový výpočet, kde by se muselo počítat nejen s vodorovným ale i svislým prouděním v trubkách. Z hlediska náročnosti této problematiky nejsem schopen obě řešení porovnat.

6 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout alternativní zavěšení ohřívačku parovzduchové směsi. Tento trubkový výměník, který je rozdělen do tří sekcí, má firmou Vítkovice Power Engineering navrženy nechlazené závěsy v první a druhé sekci. V třetí sekci se jedná o chlazené závěsy samotnou parovzduchovou směsí. Mým úkolem bylo navrhnout chlazené zavěšení i v sekci jedna a dva.

Při řešení tohoto konstrukčního úkolu, bylo nezbytné pro návrh optimální trasy závěsných trubek celý tlakový systém OPVS namodelovat v 3D programu (Solidworks). Požadavkem bylo, aby umístění a počet závěsů zůstal stejný jako v původním stavu a také aby délky závěsných trubek nebyly delší než trubky teplosměnné. V druhé sekci, která je řazena částečně jako souprout a částečně jako protiproud se přes velké úsilí nepodařilo dodržet délky závěsných trubek. Tyto závěsné trubky jsou přibližně o 42% delší než trubky teplosměnné, proto by se zde muselo kvůli tlakovým ztrátám zvolit větší průměry trubek ve svislé části závěsu. Při porovnání obou provedení u navržených chlazených závěsů jsou v průměru o 30% menší dilatační posuvy ve spodní trubce. Hodnoty prodloužení původních i alternativních závěsů jsou uvedeny v tabulce 4. Z konstrukčního hlediska se jeví pro velké množství složitých ohybů závěsných trubek varianta s chlazenými závěsy značně složitá. Rovněž z ekonomických důvodů by tato alternativa byla nevýhodná, vzhledem k větší pracnosti tlakového systému. Dále pro realizaci chlazených závěsů by se musel zhotovit nový tepelný výpočet, kde by se muselo počítat s trubkami ve svislém směru, což by ho značně zkomplikovalo. Z porovnání vyplývá, že chlazené závěsy ve srovnání s nechlazenými původními jsou konstrukčně a výrobně složitější, musí se řešit nerovnoměrnost hydraulických ztrát a teplosměnná plocha je dražší. Jedinou jejich výhodou je menší dilatační posuv u spodního bodu závěsů, což však nevyváží výše uvedené nevýhody. Proto pro realizaci OPVS doporučuji ponechat původní provedení s nechlazenými závěsy.

7 Seznam použité literatury

- [1] VILIME, L., STÁREK, K.: FES – Flexibilní energetický systém se zvýšenou účinností transformace primární energie tuhých i alternativních paliv a tepla odpadních spalín. VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., 2009.
- [2] DLOUHÝ, T., Výpočty kotlů a spalínových výměníků. vyd. 1. Praha : ČVUT, Fakulta strojní, Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení, 1999. 176 s.
- [3] Interní literatura VÍTKOVICE POWER ENGINEERING.
- [4] VILIMEC, L., Stavba kotlů I, VŠB-TU Ostrava, 2006, 118 s.
- [5] VILIMEC, L., Stavba kotlů II, VŠB-TU Ostrava, 2008, 152 s.
- [6] MILČÁK, P., Termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi. VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s., 2009.
- [7] KADLEC, Z., Sdílení tepla, VŠB – TU Ostrava, 2005.
- [8] Výzkum a vývoj flexibilního energetického systému, Prezentace pro ČEZ, VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s., 2009
- [9] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J.: Parní kotle, SNTL Praha, 1983

8 Seznam příloh

A Konstrukční projekt – výkres alternativního zavěšení ohříváku parovzduchové směsi

Poděkování

V závěru práce bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi, za odborné vedení a konzultace během vypracování mé diplomové práce.